

Biologisch abbaubare Kunststoffe

„Bestimmung des Zersetzungsgrades von biologisch abbaubaren
Kunststoffmaterialien unter nachgebildeten Heimkompostierungsbedingungen
in Anlehnung an ISO 20200:2015 als Feldversuch “

Bachelorarbeit
Studiengang: Umwelttechnik (B.Sc.)

vorgelegt von:

Marianne Münster – 

Hamburg, im Dezember 2021

Erstgutachterin: Prof. Dr. Gesine Witt (HAW Hamburg)
Zweitgutachterin: M.Sc. Silja Denise Kröger (HAW Hamburg)

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Abschlussarbeit selbstständig und nur unter Verwendung der von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel verfasst zu haben. Sowohl inhaltlich als auch wörtlich entnommene Inhalte wurden als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit hat in dieser oder vergleichbarer Form noch keinem anderen Prüfungsgremium vorgelegen.

Datum: _____ Unterschrift: _____

Danksagungen

Im Besonderen sage ich ein herzliches Dankeschön den folgenden Helfenden und Unterstützenden:

Meiner Erstgutachterin Frau Prof. Dr. Gesine Witt, die mir zu diesem Thema verholfen hat. Sie war auch aus der Ferne immer erreichbar und gab mir ein sicheres Gefühl der Unterstützung.

M. Sc. Silja Denise Kröger, meiner Zweitgutachterin, die mir die Idee und Anleitung für diese Arbeit gegeben hat. Sie hat mich zu jedem Zeitpunkt tatkräftig unterstützt. Ich erhielt durch sie eine intensive Laborbetreuung, konstruktive Kritik, Beantwortung all meiner Fragen und nebenher auch eine angenehme Gesellschaft und immer gute Laune.

M.Sc. Moritz Kielmann, der mir an zwei Tagen meiner Laborarbeit zur Seite stand, mir eine gute Anleitung gegeben hat und Freude am Erklären hatte.

Nasrin Mohammadi und Luka Gabriel Wegener, die in der Zeit meiner Arbeit als Laborassistenz tätig waren und mich in der Probenaufbereitung unterstützt haben.

Meiner Familie, die immer Rücksicht auf mich genommen hat und Interesse an meiner Arbeit gezeigt hat. Vor allem danke ich Claudia Münster, die mich bei der Korrektur unterstützt hat.

Abstract

Today, plastic can be found in almost all areas of everyday life. Its properties - long durability, moldability, low weight, low manufacturing costs - provide unlimited applications.

However, the disadvantages of plastics are becoming increasingly apparent: eventually the products become waste. This leads to enormous damage in climate and environment no matter how advanced a waste management is. Plastics are largely synthesized from organic materials such as petroleum, cellulose and coal. This results in resource consumption of raw materials and land. Furthermore, the monocultures cause a loss of biodiversity. A huge quantity of the plastic produced ends up in the environment. The decomposition process is very slow. Over time, the plastic parts decompose into smaller and smaller fragments. These are ingested by organisms and hence enter the ecosystems. Meanwhile, plastic particles can be found almost everywhere: in rivers, lakes, oceans and in the soil. In addition, it already has been found in many foods and in drinking water. To give plastics the desired attributes, many chemicals are used, such as antioxidants, plasticizers, flame retardants, biocides, and UV and heat stabilizers. They often also contain residues of the starting and auxiliary materials from the manufacturing process. For plasticizers alone, a large number of harmful effects on aquatic organisms have been proven.

This being the case, alternative products appear desirable. These products should not pose a permanent impact on humans and the environment. For the production fewer resources should be consumed. The market for so-called "bioplastics" is growing steadily. Bioplastics consist of different materials with different qualities. It is considered a bioplastic if it is either biobased or biodegradable or both.

This paper examines the status of bioplastics and their use, focusing on biodegradable plastics. Critical points and oppositions to their production, application and use are listed. Options of different disposal methods are presented and the limitations of the current technical standards of several countries in Europe are explained. The biodegradable plastics can disturb the composting process or reduce the compost quality. These materials are thermally recycled .

The EU project Bio-Plastics Europe also deals with sustainable strategies and solutions for biobased and biodegradable plastics. Products are being created whose material properties should be qualitatively comparable to those of conventional plastics. The raw materials come from renewable sources that do not compete with the food supply. The aim of this thesis is to determine the degree of decomposition of materials from the EU project. These materials are PLA, PBS and PHBV.

At present there is only limited data on the biodegradation of bioplastics in garden compost. For the labeling of a biodegradable plastic standardized requirements has been developed. The time period within which a biodegradable plastic decomposes and the degree of decomposition depend on several parameters. Plastics labeled as biodegradable often only degrade under specific conditions that are not met in a natural environment. Therefore, the degradability in home compost is investigated.

For this purpose, a test method is being developed which is based on near-natural conditions. EN ISO 20200:2015 is used as the scientific basis. Over an 8-week composting period in a rotatable drum composter, the composting process and the test materials are observed and documented. After this period, an analysis of the test material is carried out using Differential Scanning Calorimetry (DSC). In addition, the possible release of chemicals is tested. For this purpose, compost samples are taken every two weeks and are tested for the pollutant groups PCB and PAH using gas chromatography.

The results show that there is no noticeable decomposition after the said testing period. As for the release of pollutants, few PCBs are detected in the compost. It can be assumed that this is a background contamination, no pollutants seem to be released from the test material.

Zusammenfassung

Kunststoffe sind heute in fast allen Bereichen des täglichen Lebens zu finden. Ihre Eigenschaften – lange Haltbarkeit, Formbarkeit, geringes Gewicht, niedrige Herstellungskosten – ermöglichen praktisch unbegrenzte Anwendungen.

Die Nachteile von Kunststoffen werden jedoch immer deutlicher: Irgendwann werden die Produkte zu Abfall. Trotz des fortschrittlichen Abfallsystems bedeutet dies enorme Schäden für Klima und Umwelt. Kunststoffe werden zum Großteil aus organischen Stoffen wie Erdöl, Cellulose und Kohle synthetisiert. Dies führt zu einem Ressourcenverbrauch von Rohstoffen und Flächen und durch Monokulturen zum Verlust der biologischen Vielfalt. Ein bedenklich hoher Anteil des produzierten Kunststoffes gelangt in die Umwelt, wo er nur sehr langsam abgebaut werden kann. Mit der Zeit zersetzen sich die Kunststoffteile in immer kleinere Fragmente, die von Organismen aufgenommen und so in die Ökosysteme eingetragen werden. Inzwischen finden sich Kunststoffpartikel nahezu überall: in Flüssen, Seen, Meeren und in den Böden. Neben den Funden in den Umweltkompartimenten ist Plastik bereits in vielen Lebensmitteln und im Trinkwasser gefunden worden. Um Kunststoffen die gewünschten Eigenschaften zu verleihen, werden viele Chemikalien wie Antioxidantien, Weichmacher, Flammschutzmittel, Biozide sowie UV- und Wärmestabilisatoren eingesetzt. Häufig enthalten sie auch Rückstände der Ausgangs- und Hilfsstoffe aus der Herstellung. Allein für Weichmacher ist eine Vielzahl an schädlichen Wirkungen auf aquatische Organismen nachgewiesen.

Vor diesem Hintergrund erscheinen Kunststoffprodukte wünschenswert, die auch bei nicht fachgerechter Entsorgung keine dauerhafte Belastung für Mensch und Umwelt darstellen und für deren Herstellung weniger Ressourcen verbraucht werden. Der Markt für sogenanntes „Bioplastik“ wächst stetig. Diese Biokunststoffe bestehen aus verschiedenen Materialien mit unterschiedlichen Eigenschaften. Es wird von Bioplastik gesprochen, wenn es entweder biobasiert oder biologisch abbaubar ist oder beide Eigenschaften aufweist.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem aktuellen Stand im Umgang mit Biokunststoffen und deren Einsatz, wobei biologisch abbaubare Kunststoffe im Fokus stehen. Kritikpunkte und Einwände hinsichtlich Herstellung, Einsatz und Gebrauch werden aufgeführt. Es werden Optionen verschiedener Entsorgungswege vorgestellt und die Grenzen des derzeitigen technischen Stands in mehreren Ländern Europas erläutert. Die biologisch abbaubaren Kunststoffe können den Kompostiervorgang stören oder die Kompostqualität herabsetzen. Diese Materialien werden überwiegend der thermischen Verwertung zugeführt.

Auch das EU-Projekt Bio-Plastics Europe beschäftigt sich mit nachhaltigen Strategien und Lösungen für biobasierte und biologisch abbaubare Kunststoffe. Es werden Produkte kreiert, deren

Materialeigenschaften qualitativ mit denen herkömmlicher Kunststoffe vergleichbar sein sollen. Die Rohstoffe stammen aus erneuerbaren Quellen, die nicht mit der Lebensmittelversorgung in Konkurrenz stehen. Ziel der vorliegenden Arbeit ist, den Zersetzungsgrad von Materialien des EU-Projekts zu bestimmen. Hierbei handelt es sich um die Kunststoffe PLA, PBS und PHBV.

Die allgemeine Datenlage über die biologische Zersetzung von Biokunststoffen im Gartenkompost ist noch sehr gering. Zur Kennzeichnung eines biologisch abbaubaren Kunststoffes existieren normierte Anforderungen. Die Zeitdauer, innerhalb derer sich ein biologisch abbaubarer Kunststoff zersetzt, sowie der Grad der Zersetzung sind von mehreren Parametern abhängig. Kunststoffe, die als biologisch abbaubar gekennzeichnet sind, sind häufig nur unter spezifischen Bedingungen abbaufähig, die in einer natürlichen Umgebung, nicht erfüllt werden. Deswegen soll hier die Abbaubarkeit im Gartenkompost untersucht werden.

Dafür wird ein Prüfverfahren entwickelt, welches auf naturnahen Bedingungen basiert. Als wissenschaftliche Grundlage dient die EN ISO 20200:2015. Organischer Feststoffabfall und Prüfmaterialien werden in einen Trommelkomposter gegeben. Über einen 8-wöchigen Zeitraum werden der Kompostierungsprozess und die Zersetzung der Prüfmaterialien beobachtet und dokumentiert. Nach diesem Zeitraum wird eine Analyse des Prüfmaterials mittels einer Dynamischen Differenzkalorimetrie (DSC) durchgeführt. Zudem wird die mögliche Freisetzung von Chemikalien geprüft. Dazu werden alle zwei Wochen Kompostproben entnommen und mithilfe einer Gas-Chromatographie auf die Schadstoffgruppen PCB und PAK geprüft.

Die Ergebnisse zeigen, dass nach der besagten Prüfzeit keine auffällige Zersetzung festzustellen ist. Was die Freisetzung von Schadstoffen betrifft, so wurden wenige PCBs in dem Kompost nachgewiesen. Es ist davon auszugehen, dass es sich dabei um eine Hintergrundbelastung handelt, vom Prüfmaterial scheinen keine Schadstoffe freigesetzt zu werden.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	IV
Abkürzungsverzeichnis.....	V
1 Einleitung	1
2 Theoretischer Hintergrund.....	2
2.1 Umweltproblem Kunststoff.....	2
2.2 Eintragswege in die Umwelt.....	2
2.3 Umweltverhalten und Auswirkung von Kunststoffen in Böden.....	4
2.4 Lösungsansatz Abfallmanagement für Kunststoffe.....	5
2.5 Lösungsansatz Bioplastik.....	6
2.5.1 Biobasierte Kunststoffe	6
2.5.2 Biologisch abbaubare Kunststoffe.....	7
2.6 Material und Herstellung von Biokunststoffen.....	8
2.7 Anforderungen an biologisch abbaubares Material.....	9
2.7.1 Die Anforderungen der EN 14995:2006 (D)	9
2.8 Umgang mit biologisch abbaubaren Kunststoffen.....	11
2.8.1 Produktionskapazität und Verbrauch biologisch abbaubarer Kunststoffe	11
2.8.2 Problematik im Umgang mit biologisch abbaubaren Kunststoffen	11
2.8.3 Entsorgung von biologisch abbaubaren Kunststoffen in Deutschland	12
2.8.4 Umgang mit biologisch abbaubaren Kunststoffen im Ländervergleich	15
2.9 Verbesserungsvorschläge im Umgang mit biologisch abbaubaren Kunststoffen.....	17
2.10 Heimkompost als möglicher Entsorgungsweg biologisch abbaubarer Kunststoffe.....	18
3 Fragestellung und Ziel.....	20
4 Material und Methoden	21
4.1 Zu testende Kunststoffe	21
4.2 Grundlage des Testverfahrens ISO 20200:2015.....	23
4.3 Versuchsaufbau.....	23
4.4 Durchführung	24
4.4.1 Auswahl Komposter.....	24
4.4.2 Künstlicher Feststoffabfall.....	25
4.4.3 Prüfmateriale.....	27
4.4.4 Überwachung der Temperatur.....	28
4.4.5 Prüfdauer.....	28

4.4.6	Bestimmung des Zersetzungsgrads	29
4.4.7	Materialanalyse	29
4.4.8	Schadstoffanalyse.....	32
5	Ergebnisse und Diskussion	35
5.1	Überwachung der Temperatur.....	35
5.2	Überwachung des Kompostierungsprozesses.....	36
5.3	Materialuntersuchung.....	39
5.3.1	Optische Untersuchung	39
5.3.2	Zersetzungsgrad	41
5.3.3	Materialanalyse mittels DSC.....	43
5.4	Schadstoffuntersuchung	47
6	Schlussfolgerung und Ausblick	50
7	Literaturverzeichnis	52
8	Anhang	55
8.1	Kompost	55
8.2	Prüfmaterial.....	58
8.3	Bildliche Dokumentation des Prüfmaterials.....	59
8.4	Auswertung GC-MS Messung	65
8.5	GC-MS-Daten Kompostextrakte	68

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verwendete Komposttrommel (Westfalia Werkzeugcompany GmbH & Co KG, 2021) ..	24
Abbildung 2: Reifkompost aus privater Kompostierung	25
Abbildung 3: Kleintierstreu als Sägemehlersatz	25
Abbildung 4: Benutztes Kleintierstreu.....	26
Abbildung 5: Kartoffelstücke als Stärkeanteil	26
Abbildung 6: Bioabfall aus Privathaushalt.....	26
Abbildung 7: Grasschnitt	26
Abbildung 8: Prüfmaterialeingeschlagen in grobmaschigem Drahtnetz bei Versuchsbeginn	28
Abbildung 9: Prüfmaterialeingeschlagen in feinmaschigem Drahtnetz bei Versuchsbeginn	28
Abbildung 10: Komposttrommel befüllt mit frisch zusammengestelltem Feststoffabfall	28
Abbildung 11: Temperatur Verlauf Vergleich Außen- und Komposttemperatur.....	36
Abbildung 12: Feuchtigkeitsgehalt während der gesamten Prüfdauer	37
Abbildung 13: Kompost, Zeit: t0.....	38
Abbildung 14: Kompost, Zeit: t1.....	38
Abbildung 15: Kompost, Zeit: t2.....	39
Abbildung 16: Kompost, Zeit: t6.....	39
Abbildung 17: Kompost mit neuem Gemisch, Zeit: t6	39
Abbildung 18: Kompost, Zeit: t7.....	39
Abbildung 19: BPE-T-PHBV, Maschenart: fein, Zeit: t1	41
Abbildung 20: BPE-T-PHBV, Maschenart: fein, Zeit: t5	41
Abbildung 21: BPE-T-PHBV gereinigt, Maschenart: fein, Zeit: t8	41
Abbildung 22: DSC-Messkurve BPE-AMF-PLA Referenz.....	44
Abbildung 23: DSC-Messkurve BPE-AMF-PLA, Maschenart: grob	44
Abbildung 24: DSC-Messkurve BPE-RP-PLA Referenz	45
Abbildung 25: DSC-Messkurve BPE-RP-PLA, Maschenart: grob.....	45
Abbildung 26: DSC-Messkurve BPE-SP-PBS Referenz.....	46
Abbildung 27: DSC-Messkurve BPE-SP-PBS, Maschenart: grob	46
Abbildung 28: DSC-Messkurve BPE-T-PHBV Referenz.....	47
Abbildung 29: DSC-Messkurve BPE-T-PHBV, Maschenart: grob	47
Abbildung 30: GC-MS Messung Kompostproben, PCB 28 Gehalt	48
Abbildung 31: GC-MS Messung Kompostproben, PCB 101 Gehalt	49
Abbildung 32: GC-MS Messung Kompostproben, PCB 138 Gehalt	49
Abbildung 33: BPE-AMF-PLA, Maschenart: grob, Zeit: t1	59
Abbildung 34: BPE-AMF-PLA mit Ummantelung, Maschenart: grob, Zeit: t5.....	60
Abbildung 35: BPE-AMF-PLA, Maschenart: grob, Zeit: t5	60
Abbildung 36: BPE-AMF-PLA gereinigt, Maschenart: grob, Zeit: t8	60
Abbildung 37: BPE-AMF-PLA, Maschenart: fein, Zeit: t1.....	61
Abbildung 38: BPE-AMF-PLA, Maschenart: fein, Zeit: t5.....	61
Abbildung 39: BPE-AMF-PLA gereinigt, Maschenart: fein, Zeit: t8	61
Abbildung 40: BPE-RP-PLA, Maschenart: grob, Zeit: t1.....	62
Abbildung 41: BPE-RP-PLA, Maschenart: fein, Zeit: t1.....	62
Abbildung 42: BPE-RP-PLA, Maschenart: grob, Zeit: t5.....	62
Abbildung 43: BPE-RP-PLA, Maschenart: fein, Zeit: t5.....	62
Abbildung 44: BPE-RP-PLA gereinigt, Maschenart: grob, Zeit: t8	62
Abbildung 45: BPE-RP-PLA gereinigt, Maschenart: fein, Zeit: t8.....	62

Abbildung 46: BPE-SP-PBS, Maschenart: grob, Zeit: t1	63
Abbildung 47: BPE-SP-PBS, Maschenart: fein, Zeit: t1	63
Abbildung 48: BPE-SP-PBS, Maschenart: grob, Zeit: t5	63
Abbildung 49: BPE-SP-PBS, Maschenart: fein, Zeit: t5	63
Abbildung 50: BPE-SP-PBS gereinigt, Maschenart: grob, Zeit: t8.....	63
Abbildung 51: BPE-SP-PBS gereinigt, Maschenart: fein, Zeit: t8.....	63
Abbildung 52: BPE-T-PHBV, Maschenart: grob, Zeit: t1	64
Abbildung 53: BPE-PHBV, Maschenweite: fein, Zeit: t1	64
Abbildung 54: BPE-T-PHBV, Maschenart: grob, Zeit: t5	64
Abbildung 55: BPE-T-PHBV, Maschenart: fein, Zeit: t5	64
Abbildung 56: BPE-T-PHBV gereinigt, Maschenart: grob, Zeit: t8.....	64
Abbildung 57: BPE-T-PHBV gereinigt, Maschenart: fein, Zeit: t8.....	64

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Temperaturprogramm DSC, Quelle: HAW Ökotoxikologie Labor, 2021	30
Tabelle 2: Temperatur Vergleich Außen- und Komposttemperatur	36
Tabelle 3: Ergebnisse Zersetzungsgrad Prüfmaterial in grobmaschiger Drahtnetzverkleidung	42
Tabelle 4: Ergebnisse Zersetzungsgrad Prüfmaterial in feinmaschiger Drahtnetzverkleidung.....	42
Tabelle 5: Mittelwert der Ergebnisse des Zersetzungsgrads.....	43
Tabelle 6: Vergleich Mittelwert Zersetzungsgrad der unterschiedlichen Maschenweiten	43
Tabelle 7: Zusammensetzung des künstlichen Feststoffabfalls, 18.08.2021	55
Tabelle 8: Zusammensetzung des künstlichen Feststoffabfalls (der vorhandenen Feststoffmatrix zugeführt), 29.09.2021	55
Tabelle 9: Einwaage Kompostproben vor und nach Wärmetrocknung und der daraus errechnete Feuchtigkeitsgehalt, 13.10.2021 und 22.10.2021	56
Tabelle 10: Einwaage Kompostproben für ASE, 22.10.2021	56
Tabelle 11: Einwaage Kompostproben für ASE (2. Durchgang erforderlich, da manche Proben vom Gerät nicht durchlaufen worden sind), 25.10.2021	57
Tabelle 12: Volumenbestimmung Eluat für GC-MS Messung, 27.10.2021	57
Tabelle 13: PAK/ PCB IntEx Standards für CAL, Quelle: HAW Ökotoxikologie Labor, 2021	57
Tabelle 14: Einwaage Prüfmaterial bei Versuchsbeginn und -ende zur Bestimmung des Zersetzungsgrades, 18.08.2021 und 13.10.2021	58
Tabelle 15: Einwaage Prüfmaterial für DSC-Messung, 18.10.2021	59
Tabelle 16: Einwaage Rohmaterial für DSC-Messung, 18.10.2021	59
Tabelle 17: GC-MS Auswertung Kompostproben, Schadstoffgehalt in µg/kg TG	65
Tabelle 18: Weitere GC-MS Auswertung Kompostproben, Schadstoffgehalt in µg/kg TG	65
Tabelle 19: Weitere GC-MS Auswertung Kompostproben, Schadstoffgehalt in µg/kg TG	65
Tabelle 20: GC-MS Auswertung Wiederfindungsrate	66
Tabelle 21: GC-MS Auswertung Wiederfindungsrate	66
Tabelle 22: GC-MS Auswertung Wiederfindungsrate	67
Tabelle 23: GC-MS Daten Kompostextrakte.....	68

Abkürzungsverzeichnis

AbfRRL	Abfallrahmenrichtlinie
ASE	Beschleunigte Lösemittlextraktion
BPE-AMF-PLA	Bio-Plastics Europe-Agriculture Mulch Film-PLA
BPE-RP-PLA	Bio-Plastics Europe-Riched Packaging-PLA
BPE-SP-PBS	Bio-Plastics Europe- Soft Packaging- PBS
BPE-T-PHBV	Bio-Plastics Europe-Toys-PHBV
DSC	Differenzkalorimetrie
GS-MS	Gaschromatographie mit Massenspektrometer
KrWG	Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen
PAK	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe
PBAT	Polybutylenadipat-terephthalat
PBS	Polybutylensuccinat
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PE	Polyethylen
PET	Polyethylenterephthalat
PHA	Polyhydroxyalkanoate
PHB	Polyhydroxybuttersäure
PHBV	Poly(hydroxybutyrat-co-hydroxyvalerat)-Copolymere
PLA	Poly lactide
PP	Polypropylen
PTT	Polytrimethylenterephthalat
REACH-VO	Europäische Chemikalienverordnung zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe
SPE	Festphasenextraktion
TPC-ET	Thermoplastische Copolyester-Elastomere

1 Einleitung

Kunststoffe sind heute in fast allen Bereichen des täglichen Lebens zu finden und somit nicht mehr wegzudenken. Die Werkstoffe sind aus sich wiederholenden Grundeinheiten aufgebaut, den synthetisch hergestellten Polymeren. Je nach Wahl der Polymere, Herstellungsverfahren und Beimischung von Additiven lassen sich viele technische Eigenschaften variieren. Formbarkeit, Härte, Elastizität, Bruchfestigkeit, Temperatur-, Wärmeformbeständigkeit und chemische Beständigkeit ermöglichen praktisch unbegrenzte Anwendungen (PlasticsEurope, 2021). Zudem ist die Verarbeitung von Kunststoffen kostengünstig. Seit der Entwicklung Mitte des 20. Jahrhunderts hat die Verwendung stark zugenommen. Die weltweite Produktion wird auf über 300 Millionen Tonnen jährlich geschätzt, wovon ein großer Anteil als Verpackungsmaterial eingesetzt wird (KBU, 2021).

Doch Kunststoff gerät zunehmend in Kritik, und zwar aus mehreren Gründen: Irgendwann werden die Produkte zu Abfall. Trotz des fortschrittlichen Abfallsystems bedeutet dies enorme Schäden für Klima und Umwelt. Allein in Deutschland fielen im Jahr 2019 über 6 Millionen Tonnen Kunststoffabfälle an (Fitzner et al., 2020). Der überwiegende Teil mit etwa 5,4 Millionen Tonnen waren Produktabfälle, die bei privaten Endverbrauchern oder im Gewerbe anfielen. Davon stammten 3,2 Millionen Tonnen aus dem Verpackungsbereich. Produktions- und Verarbeitungsabfälle machten 0,9 Millionen Tonnen aus (Fitzner et al., 2020).

Kunststoffe werden zum Großteil aus organischen Stoffen wie Erdöl, Cellulose und Kohle synthetisiert (PlasticsEurope, 2021). Dies führt zu einem Ressourcenverbrauch von Rohstoffen, Flächen und durch Monokulturen zum Verlust der biologischen Vielfalt.

Weitere gravierende Nachteile von Kunststoffen werden zunehmend deutlich: Ein bedenklich hoher Anteil des produzierten Kunststoffes gelangt in die Umwelt, wo er nur sehr langsam abgebaut werden kann. Mit der Zeit zersetzen sich die Kunststoffteile in immer kleinere Fragmente, die von Organismen aufgenommen und so in die Ökosysteme eingetragen werden. Inzwischen finden sich Kunststoffpartikel nahezu überall: in Flüssen, Seen, Meeren und Böden. Neben den Funden in den Umweltkompartimenten ist Plastik bereits in vielen Lebensmitteln und im Trinkwasser gefunden worden (Bertling et al., 2018).

Vor diesem Hintergrund erscheinen Kunststoffprodukte wünschenswert, die auch bei nicht fachgerechter Entsorgung keine dauerhafte Belastung für Mensch und Umwelt darstellen und für deren Herstellung weniger Ressourcen verbraucht werden.

2 Theoretischer Hintergrund

2.1 Umweltproblem Kunststoff

Um konventionellen Kunststoffen die gewünschten Eigenschaften zu verleihen, werden viele Chemikalien wie Antioxidantien, Weichmacher, Flammschutzmittel, Biozide sowie UV- und Wärmestabilisatoren eingesetzt (UBA, 2020). Häufig enthalten sie auch Rückstände der Ausgangs- und Hilfsstoffe aus der Herstellung. Allein für Weichmacher ist eine Vielzahl an schädlichen Wirkungen auf aquatische Organismen nachgewiesen. Für Böden ist Ähnliches zu erwarten, da ein großer Teil der Bodenfauna im Bodenwasser lebt (UBA, 2020). Hinzu kommt das Problem, dass die Umweltkompartimente auch anderer Schadstoffexpositionen ausgesetzt sind. Die verschiedenen Substanzen können sich vermischen und zu einer Mischungstoxizität führen, die meist grösser ist als diejenige jeder Einzelsubstanz (Fent, 2013). So können beispielsweise in landwirtschaftlichen Böden die Kunststoffschadstoffe mit Pestiziden und Herbiziden interagieren. Daraus ergeben sich auch neue Schadstofftransportmechanismen (UBA, 2020). In Flüssen und Meeren können die Kunststoffpartikel nicht nur als Transportmittel für Schadstoffe dienen, sondern auch für invasive Arten und Pathogene (Essel et al., 2015).

2.2 Eintragswege in die Umwelt

Kunststoffe gelangen über unterschiedliche Wege in die Umwelt. Lange ist man davon ausgegangen, dass das fehlende oder unzureichende Abfall- und Abwassermanagement die Hauptursache für den großen Eintrag von Kunststoffen in die Umwelt darstellt (Busse et al., 2018). Zu dieser Verunreinigung trägt auch das fehlende Bewusstsein der Bevölkerung bei. Das achtlose und illegale Einbringen von Kunststoffen in die Umwelt wird heute als Littering bezeichnet (UBA, 2020). Diese Art des Umwelteintrags kann nur schwer erfasst werden. 2015 wurde geschätzt, dass auf diese Weise jährlich zwischen 4,8 und 12,7 Millionen Tonnen Kunststoff in die Weltmeere gelangen (Boucher & Friot, 2017). Das Umweltbundesamt (UBA) nimmt an, dass in Deutschland etwa 4000 Tonnen jährlich in der Umwelt (im Gewässer sowie an Land) verbleiben. Hierbei handelt es sich vor allem um Kunststoffverpackungen, Tragetaschen oder Einweggeschirr (UBA, 2020). Unter dem Einfluss von Witterung, UV-Strahlung und mechanischer Beanspruchung fragmentieren die Kunststoffteile. Erreichen die Kunststoffpartikel eine Größe kleiner als 5 mm, spricht man von Mikroplastik (Bertling et al., 2018). Dieser Prozess findet auch auf Baustellen statt, wo Folienfragmente, Bruchstücke und Späne von Kunststoffteilen oder Styropor-Kügelchen anfallen

(Busse & Rachenberg, 2019). Eine nicht unbedenkliche Menge an Kunststoffpellets gelangt ebenfalls in die Umwelt. Sie entstehen, wenn die Polymere nach der Synthetisierung zu kleinen Kunststoffgranulaten geformt werden, aus denen anschließend die Kunststoffprodukte hergestellt werden. Die Pellets können durch Zwischenfälle innerhalb der gesamten Kunststoff-Wertschöpfungskette – Herstellung, Verarbeitung, Transport oder Recycling – in die Umwelt gelangen (Boucher & Friot, 2017).

Eine Vielzahl an weiteren Eintragungspfaden ist bekannt: Vor allem in Städten und allgemein im Straßenverkehr gelangt eine große Menge an Mikroplastik über die Böden ins Grundwasser oder wird über die Kanalisation in die Kläranlage oder aber ins nächstgelegene Gewässer geleitet. Hierbei handelt es sich um Abrieb der Autoreifen, Straßenbeläge und -markierungen, Fassaden, aber auch von Kunstrasen (Liebmann, 2015). Es wird vermutet, dass allein durch den Reifenabrieb jährlich 130.000 bis 160.000 Tonnen über die Straßen von Deutschland in die Umwelt gelangen (UBA, 2020). Städtische Böden können außerdem Kunststoff aus deponiertem Material wie Bauschutt oder Auffüllungen enthalten (Busse & Rachenberg, 2019).

Nicht nur über das Abwasser der Straßen gelangen große Mengen von Kunststoff in die Kläranlagen. Auch die Haushalte spielen eine große Rolle. Hierbei sind der Abrieb von synthetischen Textilien sowie Zusätze in Wasch- und Pflegeprodukten von Bedeutung (UBA, 2020). Ein großer Teil dieses Mikroplastiks wird zwar im Sandfang der Kläranlage entfernt und anschließend entsorgt, jedoch verbleibt ein nicht unbedenklicher Teil im Klärschlamm. Ein Viertel der gesamten anfallenden Klärschlammmenge wird in Deutschland als Düngemittel ausgetragen. Seltener ist die Verwendung von Klärschlamm im Landschaftsbau mit etwas über 10 % (Bertling et al., 2018). Die im Klärschlamm enthaltenen Kunststoffe können sich durch Niederschläge auswaschen und sich weiter in der Umwelt verbreiten. Schätzungen gehen in Deutschland von jährlich 1.500 bis 3.000 Tonnen Kunststoffeinträgen in Böden durch Klärschlämme aus (UBA, 2020).

Die Böden der Landwirtschaft und des Gartenbaus sind zudem über weitere Eintragungspfade betroffen: Auf die Äcker, Wiesen, Weiden und Sonderkulturen gelangen Kunststoffe vorsätzlich über Dünge- und/oder Pflanzenschutzmittel (kunststoffumhüllte Langzeitdünger) oder sogenannte Bodenverbesserungsmittel wie Mulchfolien (UBA, 2020). Nicht beabsichtigt gelangen die Kunststoffteile in die Landwirtschaft über organische Düngemittel, die zusätzlich zum Klärschlamm ausgebracht werden. Auch Komposte und Gärreste können Kunststofffragmente enthalten, die durch falsche Entsorgung in die industrielle Kompostierung gelangen. Zu erwähnen sei auch der Anteil an Kunststoffen, der in die Landwirtschaft durch Abrieb und Fragmentierung von Folien, Vliesen, Netzen oder Pflanzentöpfen gelangt (UBA, 2020).

2.3 Umweltverhalten und Auswirkung von Kunststoffen in Böden

Kunststoffe an sich beteiligen sich kaum an biochemischen Reaktionen, rücken aber zunehmend als potenzielle Quelle für Chemikalien bzw. als Schadstoffvektor in Böden in den Fokus (UBA, 2020). Generell stellen Böden und Sedimente eine natürliche Barriere für die Ausbreitung von Partikeln und Schadstoffen ins Grundwasser dar. Messwerte von Flusssedimenten, Ufern und Stränden können dies bestätigen. Die Datenlage zu Kunststoffkonzentrationen in Böden ist bisher jedoch mangelhaft (Bertling et al., 2018). Die Filterwirkung von Böden und Sedimenten kann durch verschiedene Faktoren wie z.B. Korngrößenverteilung, organischer Anteil, Wassersättigung oder die Fließgeschwindigkeit beeinflusst werden. Das Risiko der Weiterverteilung hängt auch von den Eigenschaften der Kunststoffpartikel, der Größe, Form, Oberfläche, Ladung und Dichte ab (Liebmann, 2015).

Bedeutende Triebkräfte für die Freisetzungsmechanismen der Schadstoffe sind Temperatur, pH-Wert, die Chemie der umgebenden Phase sowie die Größenverhältnisse von Poren im Polymer zu den Molekülen des Schadstoffes (Liebmann, 2015).

Bislang sind auch nur wenige Studien zu Wirkungen von Kunststoffen auf Bodenorganismen vorhanden. Diese Fallstudien belegen jedoch, dass Kunststoffpartikel von Organismen aufgenommen werden können. So können sich Kunststoffe und die darauf angelagerten Schadstoffe entlang von marinen und terrestrischen Nahrungsketten bis hin zum Menschen akkumulieren (UBA, 2020).

Kunststoffe können in Böden durch physikalische, chemische und biologische Prozesse abgebaut werden. Dazu gehören z.B. physikalische Zerkleinerung (wie durch Abrieb, Temperatur- und/oder Feuchtigkeitswechsel oder mechanische Zerkleinerung durch größere Bodenorganismen), chemische Zersetzung durch Oxidation, hydrolytischer Abbau oder Abbau durch Enzyme und Mikroorganismen (UBA, 2020). Je kleiner ein Partikel ist, desto größer ist seine relative Oberfläche in Bezug auf sein Volumen und desto höher ist auch die potenzielle Abbaurate. Auch Bodeneigenschaften beeinflussen den Abbau. In ton- und lehmartigen Böden zeigt sich z.B. ein besserer Abbau von Kunststoffen als in sandigen Böden. Dies wird auf das reichere Bodenleben mit einer größeren Zahl an Arten und Individuen sowie günstigere Wasserverhältnisse in diesen Böden zurückgeführt (UBA, 2020). Je nach Kunststoffart, Partikelgröße und vorherrschenden Umweltbedingungen ergeben sich sehr verschiedene Abbauezeiten (Bertling et al., 2018). Genaue Aussagen können bislang dazu nicht getroffen werden. In verschiedenen Studien werden Abbauezeiten für unterschiedliche Polymere genannt, die sich auf einige Jahrzehnte bis zu 2000 Jahren belaufen. Einer der wenigen Langzeitabbaueversuche hat ergeben, dass sich der Kunststoff PE innerhalb von 4,3 Jahren nur um 0,2 % abgebaut hat. Es wird vermutet, dass sich Polymere im aquatischen Bereich schlechter als im Boden abbauen. Das Fraunhofer Forschungsinstitut bestätigt diese Vermutung allerdings nur durch eine

vergleichende Analyse für den Kunststoff PLA (mehr zu dieser Kunststoffart in 4.1) (Bertling et al., 2018). Fakt ist, dass Kunststoff sehr lange in der Umwelt verbleibt.

2.4 Lösungsansatz Abfallmanagement für Kunststoffe

Die Problematik, die durch den großen Verbrauch an Kunststoff entsteht, wurde von der Gesetzgebung erkannt, woraufhin verschiedene Regelwerke geschaffen wurden. In der EU wird die Verwertung von Abfällen in der Abfallrahmenrichtlinie 2008/98EG (AbfRRL) geregelt. Ein zentraler Bestandteil der AbfRRL ist die Abfallhierarchie, die die Abfallvermeidung priorisiert. Ist dies nicht möglich, soll eine Vorbereitung zur Wiederverwertung angestrebt werden. Auf dritter Stufe wird das Recycling empfohlen. Der energetischen Verwertung wird eine geringere Priorität zugesprochen. Eine Beseitigung sollte vermieden werden. Zur Umsetzung wurde in Deutschland 2012 das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) in Kraft gesetzt.

Die fünf Stufen der Abfallhierarchie:

1. *Vermeidung,*
2. *Vorbereitung zur Wiederverwendung,*
3. *Recycling,*
4. *Sonstige Verwertung, insbesondere energetische Verwertung und Verfüllung,*
5. *Beseitigung.*

Um die Materialien möglichst hochwertig verwerten zu können, sind seit 2015 Kunststoffabfälle in Deutschland getrennt zu sammeln. Das KrWG legt fest, dass mind. 50 % des gesammelten Siedlungsabfalls für die Wiederverwendung aufbereitet oder recycelt werden sollen (KrWG § 14).

Im Juli 2021 ist ein weiteres bedeutsames Regelwerk in Kraft getreten – das Verbot von Einweg-Plastik. Dazu gehören Trinkhalme, Rührstäbchen, Luftballonstäbe oder Einweg-Geschirr aus Kunststoff. Auch die sogenannten To-go-Becher und Einwegbehälter aus Styropor dürfen in der EU nicht mehr produziert und in den Handel gebracht werden. Ab 2022 dürfen der Handel keine leichten Kunststofftragetaschen mehr an Kundschaft ausgeben und die Pfandsysteme für Plastikflaschen sollen ausgeweitet werden. Außerdem wird auf die Verantwortung der Verbrauchenden gesetzt. Einweg- oder Mehrwegflaschen sollen deutlicher markiert werden, um den Verbrauchenden die Entscheidung zu erleichtern, überflüssiges Plastik zu vermeiden und wiederverwertbare Produkte zu kaufen (Bundesregierung, 2021).

2007 ist die Chemikalienverordnung REACH in Kraft getreten, womit das bisherige Chemikalienrecht grundlegend harmonisiert und vereinfacht wurde (Liebmann, 2015). Polymere fallen hier nicht in den Geltungsbereich (REACH-VO, Artikel 2), aber viele gängigen Stoffe, die Kunststoffen zugesetzt werden (REACH-VO, Anhang XVII). Vor allem sind verschiedene Phthalate und Flammschutzmittel relevant. In der REACH-Verordnung werden viele dieser Stoffe nun beschränkt oder verboten (Liebmann, 2015).

2.5 Lösungsansatz Bioplastik

Um die Umweltqualität zu erhalten und einen ressourcensparsamen Umgang zu pflegen, wird nicht nur auf Regelwerke der Politik gesetzt. Die Wissenschaft entwickelt nachhaltige Alternativen für die Herstellung und Verwendung von Kunststoffen. Der Markt für sogenanntes Bioplastik wächst stetig. Diese Biokunststoffe können aus verschiedenen Materialien mit unterschiedlichen Eigenschaften bestehen. Es wird von Bioplastik gesprochen, wenn es entweder biobasiert oder biologisch abbaubar ist oder beide Eigenschaften aufweist. Es lassen sich drei mögliche Gruppen ableiten (Bernnat & Keshishian, 2021):

Biologisch abbaubare Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen

Das sind Kunststoffe, die aus biomassehaltigem Ausgangsmaterial hergestellt wurden und bei denen die Eigenschaft der biologischen Abbaubarkeit nachzuweisen ist, wie z.B. PLA, PHA oder PBS.

Biologisch abbaubare Kunststoffe aus fossilen Rohstoffen

Beschreibt Kunststoffe, die biologisch abgebaut werden können, aber aus fossilen Rohstoffen hergestellt wurden, wie z.B. PBAT.

Nicht biologisch abbaubare Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen

Kunststoffe, die aus Biomasse produziert wurden, aber nicht die Eigenschaft biologische Abbaubarkeit zeigen, wie z.B. biobasiertes PE, PP oder PET (sogenannte Drop-ins), PTT oder TPC-ET.

2.5.1 Biobasierte Kunststoffe

Mit Blick auf die Erschöpfung der fossilen Ressourcen haben sich sogenannte biobasierte Materialien am Markt etabliert. Der Begriff biobasiert bezieht sich auf den Ursprung des Rohmaterials. Ein Material gilt demnach als biobasiert, wenn es ganz oder teilweise aus nachwachsenden Rohstoffen besteht (entsprechende Anforderungen sind in der EN 16575:2014 beschrieben). Doch bei solch einem Material handelt es sich nicht um eine neue Werkstoffklasse (Fraunhofer IWKS, 2018). Die ersten künstlich hergestellten Polymermaterialien basierten alle auf nachwachsenden Rohstoffen. Das heißt, sie waren biobasiert, da es damals noch keine petrochemischen Materialien gab. Seit Mitte des 20. Jahrhunderts sind die frühen biobasierten Kunststoffe mit wenigen Ausnahmen (Zellulose und

kautschukbasierte Materialien) fast vollständig durch petrochemische Materialien wie Erdöl oder Erdgas ersetzt worden. In den letzten 30 Jahren sind nun wieder Bemühungen zu verzeichnen, Kunststoffe zum Teil oder auch vollständig aus nachwachsenden Rohstoffen zu erzeugen (Fraunhofer IWKS, 2018). Der biobasierte Gehalt eines Produktes bietet jedoch keine Informationen über die Umweltauswirkungen oder Nachhaltigkeit. Ob ein Produkt biobasiert ist, lässt keine Schlussfolgerungen über biologische Abbaufähigkeit oder Kompostierbarkeit zu.

2.5.2 Biologisch abbaubare Kunststoffe

Der Ausdruck „biologisch abbaubar“ beschreibt einen biochemischen Prozess, in dem in der Umwelt vorhandene Mikroorganismen das Material unter Sauerstoffzufuhr in natürliche Substanzen wie Kohlenstoffdioxid, Wasser, mineralische Salze und Biomasse umwandeln (DIN EN 14995, Absatz 3.3). Ohne Sauerstoffzufuhr wird das Material in Kohlenstoffdioxid, Methan, mineralische Salze und Biomasse umgewandelt (DIN EN 14995, Absatz 3.3). Kompost und Boden enthalten eine besonders große Mikroorganismendiversität und hydrolytische Aktivität. Insbesondere Pilze spielen eine wesentliche Rolle bei der aeroben Polymerhydrolyse, während unter anaeroben Bedingungen vorwiegend Bakterien diese Aktivität aufweisen (Burgstaller et al., 2018).

Der Prozess des biologischen Abbaus hängt von mehreren Faktoren ab: Anzahl der Mikroorganismen und Zusammensetzung der mikrobiellen Population; Umweltbedingungen wie Wasserverfügbarkeit, Temperatur, Sauerstoffgehalt, pH-Wert und Nährstoffgehalt; Bioverfügbarkeit des abzubauenen Materials (Meier, 2018). Mit der Kompostierung des Materialabfalls soll eine zusätzliche Entsorgungsmöglichkeit der biologisch abbaubaren Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen geschaffen werden. Kompostierbarkeit ist in der DIN EN ISO 20200:2005 definiert als die Eigenschaft eines Materials, in einem Kompostierungsprozess biologisch abgebaut zu werden. Um die Kompostierbarkeit eines Materials bescheinigen zu können, muss nach einem genormten Prüfverfahren der biologische Abbau im Kompostierungssystem nachgewiesen werden (DIN EN ISO 20200:2005, 3.2).

Eingesetzt werden biologisch abbaubare Kunststoffe weltweit vor allem als Abfallbeutel für die Sammlung von Bioabfällen, in der Landwirtschaft, im Gartenbau als Mulchfolie, in Textilien, in Verpackungen, in der Automobilbranche oder in kurzlebigen Konsumgütern (Burgstaller et al., 2018).

2.6 Material und Herstellung von Biokunststoffen

Als Ausgangsstoff für Biokunststoffe dienen überwiegend kohlenhydratreiche Pflanzen wie Mais oder Zuckerrohr. Die Biomasse kann aber auch aus Ölen aus Raps, Sonnenblumenkernen, Soja oder Kokospalmen gewonnen werden sowie auch aus Stoffen tierischen Ursprungs, wie Chitin (Endres et al., 2020). Für fast jedes herkömmliche Kunststoffmaterial und dessen Anwendung kann eine Alternative aus Biokunststoff geschaffen werden. Die Materialien können mit herkömmlichen Kunststoffverarbeitungstechnologien zu einer breiten Palette von Produkten verarbeitet werden. Die Prozessparameter der Verarbeitungsanlagen müssen lediglich an die individuelle Spezifikation des jeweiligen Polymers angepasst werden (European Bioplastics, 2021). Die geringen Produktionsmengen an Biokunststoffen lassen sich demnach nicht durch eine unzureichende technische Machbarkeit erklären. Der entscheidende Punkt ist wohl vielmehr der Preis, der durch die anfänglich kleineren Produktionskapazitäten noch deutlich höher ist (Endres et al., 2020).

Biokunststoffe werden heute in zwei Werkstoffgruppen unterteilt – die Old-Economy- und die New-Economy-Biokunststoffe (Endres et al., 2020). Die Old-Economy-Werkstoffe bezeichnen die Materialien, wie in 2.5.1 beschrieben, die vor der Entwicklung petrochemischer Kunststoffe hergestellt worden sind und bis heute so bestehen. Dazu gehören beispielsweise cellulose- und kautschukbasierte Werkstoffe. Die New-Economy-Werkstoffe sind in den letzten 20 bis 30 Jahren entstanden. Dazu gehören die neuartigen und die Drop-in-Werkstoffe. Die biobasierten Drop-ins, wie z.B. Bio-PE, ähneln in ihrer chemischen Struktur und Eigenschaft den konventionellen Pendanten. Die neuartigen Werkstoffe wie z.B. PLA besitzen eigene Eigenschaftsprofile (Endres et al., 2020).

In einer Studie wurden die Drop-ins Bio-PE und Bio-PET mit ihren fossilen Pendanten verglichen (Endres et al., 2020). Die Herstellung der Stoffe ist weitestgehend identisch. Die beiden Prozesse unterscheiden sich nur in der Gewinnung des Grundbausteins Ethylen. Im Fall von biobasiertem PE wird Zucker oder Stärke mit Hilfe von Hefen fermentiert und das dabei entstehende Ethanol durch Dehydratisierung zu Ethylen umgewandelt (European Bioplastics, 2021). Für die besagten Biokunststoffe ergeben sich ökologische Vor- wie auch Nachteile. Die Vorteile lassen sich größtenteils aus dem geringeren Treibhausgaspotential ableiten. In anderen Bereichen wie Eutrophierung kann es dagegen zu Umweltbelastungen kommen. Zudem wurde allerdings auch die Problematik erläutert, die einen objektiven Vergleich von Biokunststoffen und konventionellen Kunststoffen erschwert. Die Informationen über Biokunststoffe werden von Industrie und Wissenschaft veröffentlicht, wohingegen die Informationen über konventionelle Kunststoffe verstärkt vom europäischen Kunststoffverband kommen. Der Verband führt eine eigene Methodik im Rahmen von Durchschnittswerten für einzelne Kunststoffarten zur Bilanzierung durch (Endres et al., 2020).

Eindeutig dagegen ist ein Nachteil über Biokunststoffe zu benennen: Biokunststoffe, die aus Pflanzenbestandteilen synthetisiert werden, stehen damit in Konkurrenz mit der Lebensmittelindustrie (Endres et al., 2020). In Hinblick auf die steigende Bevölkerungsdichte und die Ernährungssituation in manchen Teilen der Welt ist dies ein ernstzunehmendes Problem. Unter diesem Aspekt forscht die Industrie für Biokunststoffe an alternativen Ausgangsstoffen. Hierfür wird auf nicht essbare Produkte gesetzt, die idealerweise als unbrauchbare Nebenprodukte anfallen. Z.B. fallen große Mengen an Stroh oder Bagasse in der Lebensmittelproduktion an, die in der Regel nach der Ernte auf den Feldern verbleiben. Als weitere Ausgangsstoffe werden bestimmte Pilzkulturen und Algen verwendet (European Bioplastics, 2021).

2.7 Anforderungen an biologisch abbaubares Material

Da die Zersetzung von unterschiedlichen Umweltbedingungen abhängig ist, wurden angepasste Prüfmethode für unterschiedliche Lebensräume entwickelt – für die industrielle Kompostierung, Gartenkompostierung, biologische Abbaubarkeit im Boden, in mariner Umwelt und unter Süßwasserbedingungen (Meier, 2018). In den Prüfprogrammen sind Minimalanforderungen für den Abbau in einem definierten Zeitraum festgelegt. Die standardisierten Prüfmethode unterscheiden sich vor allem in ihrer Matrix und Inkubationstemperatur. Diese spezifischen Bedingungen werden in Normen beschrieben, wie der europäischen Norm für die Bewertung der Kompostierbarkeit von Kunststoffen EN 14995. Für Verpackungsmaterialien gelten die Anforderungen an die Verwertung von Verpackungen durch Kompostierung und biologischen Abbau der EN 13432. Materialien und Produkte, die diesen Normen entsprechen, können zertifiziert und als kompostierbar gekennzeichnet werden.

Mit dem Verfahren der ISO 14855-1:2012 kann die vollständige biologische Abbaubarkeit von Kunststoffen überprüft werden. Vorgaben der ISO 20200:2015 machen es möglich, den Zersetzungsgrad eines Kunststoffes bei einer Kompostierung im Labormaßstab zu bestimmen.

2.7.1 Die Anforderungen der EN 14995:2006 (D)

Biologische Abbaubarkeit

90 % des Prüfmaterials müssen unter Laborbedingungen aerober Abbautests innerhalb von maximal 6 Monaten in Kohlenstoffdioxid umgewandelt werden. Unter anaeroben Bedingungen darf eine maximale Prüfdauer von 2 Monaten nicht überschritten werden. Während dieser Zeit müssen mindestens 50 % abgebaut sein (EN 14995, Anhang A2).

Desintegration

Der biologische Abbau besteht aus verschiedenen parallel oder nachfolgend ablaufenden abiotischen und biotischen Schritten. Der Abbau bei Polymeren erfolgt zweistufig. Desintegration ist der erste Schritt im biologischen Abbau, in dem das Material in kleinere Fragmente zerlegt wird (Fraunhofer UMSICHT, 2021). Nach 12 Wochen dürfen keine Kunststoffpartikel mehr im Medium, etwa Kompost, mit dem bloßen Auge erkennbar sein. Dabei dürfen nicht mehr als 10 % der ursprünglichen Trockenmasse als Stücke > 2 mm wieder auffindbar sein. Für die anaerobe Behandlung werden die gleichen Anforderungen gestellt, allerdings für eine Prüfdauer von maximal 5 Wochen (EN 14995, Anhang A3).

Diese Anforderung sollte kritisch beurteilt werden. Zum einen wird die Desintegration unter realen Bedingungen stark von den Umgebungsbedingungen, vor allem Temperatur, Feuchtigkeit und pH-Wert beeinflusst (Burgstaller et al., 2018). Somit lassen sich Prüfergebnisse unter Labormaßstab kaum auf reale Bedingungen übertragen. Zum anderen werden im Zusammenhang mit biologisch abbaubaren Kunststoffen auch oxo-abbaubare Kunststoffe genannt (Meier, 2018). Bei dieser Kunststoffart handelt es sich in chemischer Hinsicht größtenteils um Polymere, die in ihrer Gestalt den konventionellen Kunststoffen ähnlich sind, jedoch mit einer bedeutenden Ausnahme. Zwischen den Kohlenstoffatomen der Polymerketten werden „Sollbruchstellen“ eingebaut. Diese können aus Sauerstoff und Stickstoff bestehen, die von Mikroorganismen verstoffwechselt werden können (Trabert, 2010). Es können auch Sollbruchstellen mit Additiven wie Kobalt-, Mangan- und Eisenverbindungen geschaffen werden, die einen Zerfall der Produkte in kleinere Fragmente bewirken. Die gebildeten Fragmente solcher Kunststoffe unterliegen keinem schnellen biologischen Abbau (Türk, 2014). In diesem Fall ist weiteres Mikroplastik geschaffen, welches sich in der Umwelt anreichern kann.

Ökotoxikologie

Der Abbauprozess darf keine Auswirkung auf die Qualität des Kompostes haben. Dies ist durch eine Ökotoxizitätsanalyse anhand eines Pflanzenwachstumstests auf dem betroffenen Kompost zu beweisen (EN 14995, Anhang A4).

Grenzwerte

Im Anhang 1 der EN 14995 sind Grenzwerte für Schwermetalle und andere toxische und gefährliche Stoffe aufgelistet.

Zudem ist das Material zu charakterisieren und zu kennzeichnen (EN 14955, Absatz 4.2.6).

2.8 Umgang mit biologisch abbaubaren Kunststoffen

2.8.1 Produktionskapazität und Verbrauch biologisch abbaubarer Kunststoffe

Seit fast 20 Jahren werden kompostierbare Materialien in verschiedenen Bereichen eingesetzt (Bernnat & Keshishian, 2021). Aktuell ist der Marktanteil von Biokunststoffen an der globalen Kunststoffproduktion eher gering. Im Jahr 2019 belief sich die Produktionskapazität von Biokunststoffen weltweit auf rund 1,38 Millionen Tonnen, wovon biologisch abbaubare Produkte rund 720.000 Tonnen ausmachten (Statista, 2021). Konventionelle Kunststoffe machen etwa 99 % der Kunststoffproduktion aus (Burgstaller et al., 2018).

In Europa und in Deutschland besteht ein kleiner, jedoch stetig wachsender Markt für biologisch abbaubare Kunststoffe (Burgstaller et al., 2018). In Europa lag 2018 die Produktionsmenge an biologisch abbaubaren Kunststoffen bei ca. 100.000 Tonnen. Aktuell wird biologisch abbaubares Material hauptsächlich im Verpackungssektor angewendet, aber auch in der Landwirtschaft und im Gartenbau. Die fünf Bestseller auf den EU-Märkten im Jahr 2015 waren Einkaufstüten, Bioabfallbeutel, feste Verpackungen, Einweggeschirr und -besteck sowie flexible Verpackungen. Die großen Hersteller von biologisch abbaubaren Kunststoffen in Europa sind in Italien, Frankreich, Deutschland und den Niederlanden niedergelassen (Meier, 2018).

2.8.2 Problematik im Umgang mit biologisch abbaubaren Kunststoffen

Der Einsatz dieser Materialien und besonders der Umgang mit biologisch abbaubaren Kunststoffabfällen stehen jedoch in Kritik. Die biologische Abbaubarkeit wird einerseits als mögliche Lösung für die langfristige „Vermüllung“ der Umwelt betrachtet, andererseits besteht die Befürchtung, dass Produkte, die als kompostierbar gekennzeichnet sind, einen potenziell verstärkten Eintrag in die Umwelt mit sich bringen (Burgstaller et al., 2018). Kunststoffe, die als biologisch abbaubar gekennzeichnet sind, sind häufig nur unter spezifischen Bedingungen abbaufähig, die in einer natürlichen Umgebung nicht erfüllt werden (Meier, 2018). Im Mittelpunkt der Diskussion steht jedoch der Umgang mit den biologisch abbaubaren Kunststoffabfällen. Die biologisch abbaubaren Kunststoffe können den Kompostiervorgang stören oder die Kompostqualität herabsetzen. Diese Materialien werden derzeit der thermischen Verwertung zugeführt. Eine ökologisch sinnvolle Entsorgung für biologisch abbaubare Kunststoffe ist bis heute nicht geklärt. Verbrauchende sind sich der Entsorgung nicht sicher oder sehen womöglich keinen Vorteil in der Verwendung biologischer Kunststoffe. Produzierende Unternehmen, die ihre Produkte möglichst nachhaltig gestalten wollen, sind unzufrieden (Bernnat & Keshishian, 2021).

2.8.3 Entsorgung von biologisch abbaubaren Kunststoffen in Deutschland

Biologisch abbaubare Kunststoffe sind ursprünglich nicht für eine Kreislaufwirtschaft gedacht (Burgstaller et al., 2018). Die Materialien sind dafür entwickelt, sich so schnell wie möglich abzubauen, was einer Mehrfachnutzung im Wege steht. Die Herstellungsprinzipien und Zusammensetzung dieser Materialien sind jedoch sehr unterschiedlich. Studien haben ergeben, dass viele Kunststoffe, die als biologisch abbaubar zertifiziert sind, sich unter bestimmten Voraussetzungen wiederverwenden ließen. Das würde bedeuten, dass biologisch abbaubare Kunststoffe theoretisch nach allen Stufen der Abfallhierarchie entsorgt werden könnten:

Vorbereitung zur Wiederverwendung

Die Wiederverwendung von biologisch abbaubaren Produkten ist unter bestimmten Voraussetzungen möglich.

Werkstoffliches und rohstoffliches Recycling

Es konnte bewiesen werden, dass einige biologisch abbaubare Kunststoffe werkstofflich sowie rohstofflich recycelt werden können.

Stoffliche Verwertung

Wie schon beschrieben, ist eine stoffliche Verwertung über die industrielle Kompostierung, Gartenkompostierung sowie durch Vergärung zielführend.

Sonstige Verwertung

Die Verwertung biologisch abbaubarer Kunststoffabfälle in Müllverbrennungsanlagen entweder in einem Abfallgemisch oder über eine gezielte Herstellung von Ersatzbrennstoffen kann zur Gewinnung von thermischer und elektrischer Energie genutzt werden.

(Burgstaller et al., 2018)

Entsorgungsweg Biotonne

In Deutschland werden organische Abfälle aus Privathaushalten über die sogenannte Biotonne gesammelt. In industriellen Kompostierungs- und Vergärungsanlagen werden daraus Kompost und Gärreste als Düngemittel sowie in Biogasanlagen Energie gewonnen (Bernnat & Keshishian, 2021).

Die industrielle Kompostierung umfasst in der Regel drei Schritte: Vorbereitung, intensive Rotte und Nachrotte (Meier, 2018). Das Material wird während der Vorbereitungsphase geschreddert und homogenisiert. Anschließend wird der Bioabfall unter der kontrollierten Zugabe von Sauerstoff und Feuchtigkeit abgebaut. Während der Nachrotte wird der frische Kompost stabilisiert und in fertigen Kompost umgewandelt. Beim Eingang in die Anlage wird je nach Verfahren der gesammelte Biomüll nach Größe und Beschaffenheit sortiert, wobei alle nicht-organischen Abfälle als Störstoffe aussortiert

werden, weil diese im gängigen Rottezyklus nicht vollständig zersetzt werden und Reste hinterlassen (Meier, 2018).

Nach der Bioabfallverordnung (BioAbfV) darf Biokunststoff auch als Bioabfall behandelt werden, wenn das Material nach DIN EN 14995 oder DIN EN 13432 zertifiziert wurde (BioAbfV Anhang 1, N.1). Die Verordnung ist allerdings so formuliert, dass Verpackungsmaterialien, unabhängig von ihrer chemischen Zusammensetzung und Kompostierfähigkeit, nicht über die Biotonne entsorgt werden dürfen.

In Deutschland herrschen in den industriellen Großanlagen unterschiedliche Kompostierzyklen. Die Zeit ist abhängig von der Größe der Anlage, der wirtschaftlichen Perspektive (die Kosten sind für kürzere Zyklen geringer) und der Nachfrage des Endproduktes (Frischekompost hat in der Regel eine kürzere Hauptrotte; Fertigungskompost eine längere) (Bernnat & Keshishian, 2021). Das Biogas- und Kompostwerk Bützberg beispielweise, das für die Bioabfallverwertung Hamburgs zuständig ist, befördert den organischen Abfall nach der Sortierung und Zerkleinerung erst in die Biogasanlage. Unter Luftabschluss und einer Temperatur von 38 °C beginnt unter Anwesenheit bestimmter Mikroorganismen ein Abbauprozess, wobei Methan freigesetzt wird. Die Gärreste aus der Biogasanlage werden nach drei Wochen mit etwas rohem Bioabfall versetzt und in die Rottehalle transportiert, wo der eigentliche Kompostierungsprozess stattfindet. Nach vier bis fünf Wochen ist die Kompostierung dann abgeschlossen (Möller, 2021).

In vielen Kompostierungsanlagen Deutschlands wird allerdings jeweils für Haupt- und Nachrotte eine Zeit von unter drei Wochen angesetzt. Somit bleiben nicht zersetzte Reststoffe übrig. Die Anforderungen der DIN EN 13432 wären damit nicht erfüllt (Burgstaller et al., 2018). Laut Düngemittelverordnung ist die Masse an Reststoffen im Reifkompost seit 2019 begrenzt (DümV Anhang 2, Tab. 8). Zudem lässt sich Kompost mit sichtbaren Verpackungsresten oder anderen Fremdkörpern schlechter verkaufen, da dieser als von minderer Qualität angesehen wird (Bernnat & Keshishian, 2021).

Ein weiteres Problem besteht darin, dass ein Produkt, das durch eine Zertifizierung als kompostierbar gilt, bislang nicht von herkömmlichen Kunststoffen unterschieden werden kann und somit auch als Störstoff in der thermischen Verwertung landet (Bernnat & Keshishian, 2021). Nur wenn keine Vorsortierung stattfindet oder der biologisch abbaubare Kunststoff so dünn ist, dass er nicht abgetrennt werden kann, werden biologisch abbaubare Materialien industriell kompostiert (Bernnat & Keshishian, 2021).

Auch im Vorgang der industriellen Vergärung bestehen Probleme (Burgstaller et al., 2018). Die Vergärung von Bioabfällen der deutschen Haushalte und damit auch die Vergärung als Verwertungsoption für biologisch abbaubare Kunststoffe haben eine geringere Bedeutung. Aufgrund dessen existiert bislang auch keine Prüfnorm für die Vergärung biologisch abbaubarer Kunststoffe. Aktuell werden die biologisch abbaubaren Kunststoffe auch hier als Störstoffe aussortiert (Burgstaller et al., 2018).

Andere Entsorgungswege

Über den Restmüll entsorgte biologisch abbaubare Produkte werden entweder unsortiert in der Müllverbrennungsanlage thermisch oder nach einer mechanisch-biologischen Abfallbehandlung energetisch hochwertiger als Ersatzbrennstoffe verwertet (Bernnat & Keshishian, 2021).

Für alle Materialien, für die das Entsorgungssystem der gelben Tonne Möglichkeiten zur stofflichen Verwertung bereitstellt, werden Fraktionen geschaffen (Bernnat & Keshishian, 2021). Beim stofflichen Recycling werden Kunststoffabfälle, die sortenrein oder gemischt vorliegen, zu neuen Kunststoffen eingeschmolzen. Verunreinigungen in diesen Mischungen sorgen für minderwertige Kunststoffe. Daher wird versucht, möglichst sortenreine Abfälle zum Einschmelzen zu gewinnen. Der Rest, das trifft derzeit auf etwa 50 % des über die gelbe Tonne gesammelten Abfalls zu, geht in die thermische Verwertung. Ob und ab wann biologisch abbaubare Kunststoffreste das Recycling konventioneller Stoffe stören, steht noch in Diskussion. Sollten kompostierbare Materialien hierbei keine Störstoffe darstellen, können sie aber auch keiner Fraktion zugeordnet werden und werden als Sortierreste ebenfalls thermisch verwertet. Werden biologisch abbaubare Materialien über die blaue Tonne entsorgt, werden diese ebenfalls als Störstoffe aussortiert (Bernnat & Keshishian, 2021).

Trotz der vorteilhaften Energiegewinnung und des Ersetzens fossiler Brennstoffe wird die thermische Verwertung von biologisch abbaubaren Kunststoffen als kritisch beurteilt (Bernnat & Keshishian, 2021). Obwohl die Müllverbrennungen mit modernen Filteranlagen ausgestattet sind, bleiben schädliche Feinstäube zurück, die auf Sonderdeponien gelagert werden müssen. Dank der strengen Grenzwerte gilt dies wohl nur bedingt für kompostierbare Materialien. Die Kompostierung bietet eine klare Verwertungsalternative für biologisch abbaubare Kunststoffe, deren technische Möglichkeiten leider noch nicht lösungsorientiert umgesetzt wurden (Bernnat & Keshishian, 2021).

2.8.4 Umgang mit biologisch abbaubaren Kunststoffen im Ländervergleich

In den meisten Ländern Europas liegt kein spezialisiertes Verwertungskonzept für biologisch abbaubare Kunststoffe vor (Meier, 2018). Die Ansichten über die ökologische Vorteilhaftigkeit dieser Materialien sind europaweit unterschiedlich. Das Europäische Netzwerk der Leitungen der Umweltschutzbehörden (EPA-Netzwerk) führte 2018 eine Studie durch, für die 16 Länder zum Umgang mit biologisch abbaubaren Kunststoffen befragt wurden. Es zeigt sich, dass die Mehrheit der Befragten biologisch abbaubaren Kunststoffen eher skeptisch gegenübersteht. Die meisten Bedenken bestehen in Bezug auf die tatsächliche biologische Abbaubarkeit, die Kontaminierung der bestehenden Abfallströme und das Risiko eines gesteigerten Litterings (Meier, 2018). Dementsprechend gibt es auch abweichende Ansätze im Umgang mit der Entsorgung dieser Produkte. Nur in wenigen Ländern wird durch die Gesetzgebung der Einsatz von biologisch abbaubaren Kunststoffen begünstigt (Burgstaller et al., 2018). Zu diesen Ländern zählen derzeit Belgien, Frankreich, Italien, den Niederlanden und Rumänien. Weitere Entwicklungen sind in Spanien, Österreich und Zypern zu beobachten. So müssen beispielsweise in Österreich geringere Abgaben für Verpackungsmaterial gezahlt werden, wenn dieses aus biologisch abbaubaren, anstelle von konventionellen Kunststoffen, gefertigt wurde. Die Abgaben werden gemäß den Konformitätsplänen für Sammlung und Recycling von Biomüll gezahlt. In Zypern soll es immerhin einen indirekten finanziellen Vorteil geben, da biologisch abbaubare Kunststoffe im Rahmen der Vorgaben für die öffentliche Beschaffung bevorzugt werden (Meier, 2018).

Im Folgenden wird auf fünf weitere Länder eingegangen, um einen Einblick in verschiedene Wege im Umgang mit biologisch abbaubaren Kunststoffen zu erhalten. Es zeigt sich, dass mit Ausnahme von Italien in keinem der Länder Europas ein konkretes bzw. funktionierendes Verwertungskonzept für biologisch abbaubare Kunststoffe etabliert ist (Burgstaller et al., 2018). Genau wie in Deutschland werden biologisch abbaubare Kunststoffe zum Großteil als Bestandteil der Restmüll und Störstofffraktion energetisch verwertet oder beseitigt. In Italien hingegen sind biologisch abbaubare Kunststoffe bereits in die Verwertungsstrukturen integriert, weshalb der Großteil hier industriell kompostiert werden kann (Burgstaller et al., 2018).

Umgang mit biologisch abbaubaren Kunststoffen in Frankreich

Frankreich hatte im Jahr 2015 mit 6.000 – 8.000 Tonnen einen deutlich geringeren Verbrauch an biologisch abbaubaren Kunststoffen als Deutschland (12.000 – 15.000 Tonnen) (Burgstaller et al., 2018). Trotzdem wird in diesem Land der Einsatz bestimmter biologisch abbaubarer Kunststoffprodukte durch die Regelung gefördert, dass Obst- und Gemüsebeutel, sowie seit 2020 Einweggeschirr und Wattestäbchen, gartenkompostierbar und biobasiert sein müssen. Laut Gesetz müssen biologisch abbaubare Kunststoffe entsprechend gekennzeichnet sein. Daher gelangen

tendenziell auch weniger von den biologisch abbaubaren Kunststoffen zu Recyclinganlagen, sondern werden bevorzugt über die Biotonne oder den Restmüll entsorgt. Die biologisch abbaubaren Kunststoffe werden grundsätzlich von den Betreibenden der Kompostieranlagen akzeptiert und nicht aussortiert. Aufgrund längerer Rottezyklen von drei bis sechs Monaten werden keine Probleme über Rückstände der biologisch abbaubaren Kunststoffe im Kompost berichtet. Zukünftig soll die biologische Abfallbehandlung stärker ausgebaut werden, so dass dieser Entsorgungsweg für die biologisch abbaubaren Kunststoffe bedeutender wird (Burgstaller et al., 2018).

Umgang mit biologisch abbaubaren Kunststoffen in Italien

In Italien wurden 2015 45.000 – 50.000 Tonnen an biologisch abbaubaren Kunststoffen verbraucht, womit in Italien der größte Verbrauch in Europa zu verzeichnen ist (Burgstaller et al., 2018). Hier gelten die gleichen Regelungen wie bereits für Frankreich beschrieben. Zudem müssen alle Einweg-Kunststofftüten und -beutel industriell kompostierbar und biobasiert sein. Auch oxo - fragmentierbare Tüten sind nicht erlaubt. Zusätzlich sind in Italien alle nach EN 13432 zertifizierten Produkte für die industrielle Kompostierung zugelassen. Die Rottezeit beträgt in der Regel etwa 4 Monate. Dadurch dass der Fokus auf biologisch abbaubaren Tüten und Beuteln liegt, ist der Anteil an Störstoffen in den Kompostierungsanlagen auch geringer. Befinden sich nach der Kompostierung größere Kunststoffrückstände im Kompost, werden diese meist in den nächsten Kompostierzyklus integriert. In den meisten italienischen Vergärungsanlagen sind aerobe Behandlungen nachgeschaltet, was die Vergärung von biologisch abbaubaren Kunststoffen möglich macht. Recycling von biologisch abbaubaren Kunststoffen hat in Italien dagegen eine viel geringere Bedeutung, da nicht mal 1 % der biologisch abbaubaren Kunststoffe in den Recyclingstrom gelangen (Burgstaller et al., 2018).

Umgang mit biologisch abbaubaren Kunststoffen in den Niederlanden

Zwar wird auch in den Niederlanden der Einsatz biologisch abbaubarer Kunststoffe durch finanzielle Anreize gefördert, die Mengen an solchen Produkten sind jedoch so gering (7.000 – 9000 Tonnen im Jahr 2015), dass eine klare Position nicht deutlich zu erkennen ist (Burgstaller et al., 2018). Biologisch abbaubare Kunststoffe werden vorrangig noch über den Restmüll entsorgt. Laut dem Abfallwirtschaftsplan sind nur Bioabfallbeutel nach EN 13432 für die industrielle Kompostierung zulässig. Ähnlich wie in Deutschland entsprechen die Rottezyklen der meisten Anlagen nicht der Abbaueigenschaften dieser Produkte. Die biologisch abbaubaren Kunststoffe werden überwiegend schon in der Vorsortierung dem Bioabfall entnommen und mit anderen Störstoffen der thermischen Verwertung zugeführt. Doch eine Ausnahme macht die Niederlande zum Vorreiter im Umgang mit biologisch abbaubaren Kunststoffen: Bei einigen Großveranstaltungen wird Geschirr, Besteck und Becher aus biologisch abbaubarem Material separat gesammelt und in einem eigenen Recyclingstrom verwertet oder kompostiert (Burgstaller et al., 2018).

Umgang mit biologisch abbaubaren Kunststoffen in Schweden

In Schweden finden biologisch abbaubare Kunststoffe zwar Erwähnung, auf Grund von geographischen Gegebenheiten wird hier allerdings der Fokus auf biobasierte Produkte gelegt (Burgstaller et al., 2018). Obwohl Schweden als Vorreiter in Sachen Nachhaltigkeit bezeichnet wird, gelten hier keine expliziten Regelungen zu biologisch abbaubaren Kunststoffen, keine Förderung oder Begünstigung. Das Land hat keinen großen Bestand an Kompostierungsanlagen. Der Bioabfall wird überwiegend durch Vergärung verwertet, wobei die biologisch abbaubaren Kunststoffe vorher als Störstoffe aussortiert und ebenfalls thermisch verwertet werden. Die Meinung, ob biologisch abbaubare Kunststoffe den Recyclingprozess beeinträchtigen können, ist geteilt. Tatsächliche Probleme dazu sind bislang nicht bekannt, da nur sehr geringe Mengen an biologisch abbaubarem Kunststoff im Umlauf sind, die über die gelbe Tonne entsorgt werden. Im Restmüll werden biologisch abbaubare Kunststoffe ohne Vorsortierung verbrannt (Burgstaller et al., 2018).

2.9 Verbesserungsvorschläge im Umgang mit biologisch abbaubaren Kunststoffen

Die Europäische Kommission rät dazu, biologisch abbaubare Materialien besser zu kennzeichnen, damit die Verbrauchenden verstehen, wie Produkte aus biologisch abbaubaren Materialien ordnungsgemäß entsorgt werden können, um somit Fehlentsorgung und Littering vorzubeugen (Meier, 2018).

Das UBA ist der Meinung, dass das Vorsorgeprinzip der Abfallhierarchie mehr Anwendung erhalten sollte (Meier, 2018). Aus ökobilanzieller Sicht sollte eine Wiederverwendung oder ein Recycling von Kunststoffen angestrebt werden. Die Produkte sollten nicht als Einwegprodukte andere Materialien ersetzen, so wie es bislang hauptsächlich der Fall ist. Grundsätzlich ist die biologische Abbaubarkeit von Kunststoffen erst dann vorteilhaft, wenn durch die Eigenschaft der Abbaubarkeit ein Zusatznutzen entsteht (Meier, 2018).

Es bestehen für Deutschland Ideen, die sich an Länder wie Italien und Frankreich orientieren (Burgstaller et al., 2018). Dazu gehört beispielsweise das Verbot sämtlicher leichten Kunststoffabfallbeutel sowie der Obst- und Gemüsebeutel. Diese sollten nach EN 13432 zertifiziert auf den Markt gebracht und überwiegend aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden. Grundsätzlich werden diese Ansätze als interessant erachtet. Fehlwürfe im Bioabfall könnten damit reduziert und die Bioabfallsammlung gestärkt werden. Die Umsetzung dieser Regelungen macht allerdings nur dann Sinn, wenn gleichzeitig begleitende Maßnahmen umgesetzt werden. So müssten beispielsweise die Kompostierzyklen deutscher Kompostieranlagen verlängert werden. Dies könnte

jedoch höhere Verfahrenskosten bedeuten und möglicherweise auch höhere Abfallgebühren. Eine denkbare Maßnahme wäre dagegen die aussortierten Reststoffe nach der Kompostierung in den neuen Kompostierzyklus einzubringen, um den biologisch abbaubaren Kunststoffen eine längere Zersetzungszeit zu gewährleisten (Burgstaller et al., 2018).

Um die Menge an biologisch abbaubaren Kunststoffen, die thermisch verwertet werden zu reduzieren, könnte die Gartenkompostierung als alternativer Entsorgungsweg in Betracht gezogen werden. Da der Abbau in der Gartenkompostierung bei geringen Temperaturen garantiert sein muss, ist zu erwarten, dass der Abbau bei höheren Temperaturen, wie in der industriellen Kompostieranlage, in kürzerer Zeit stattfinden wird (Burgstaller et al., 2018). Dadurch ist der Kunststoff sowohl für die Entsorgung im eigenen Garten, gleichzeitig auch für die Entsorgung über die industrielle Kompostierung geeignet. Auch Transportemissionen und Energie würden mit einer vermehrten Kompostierung im eigenen Garten eingespart werden. Leider stellt der Markt in Deutschland kaum Produkte bereit, die als „gartenkompostierbar“ zertifiziert sind. (Burgstaller et al., 2018).

2.10 Heimkompost als möglicher Entsorgungsweg biologisch abbaubarer Kunststoffe

Die Eigenkompostierung wird nicht als Alternative zur Getrenntsammlung angesehen, sondern als eine sinnvolle Ergänzung dazu (Menzel et al., 2015). Nur ein geringer Anteil der deutschen Bevölkerung ist in der Lage, eine Kompostierung im Garten zu praktizieren. Vor allem in städtischen Regionen ist dies kaum möglich. Zudem besteht ein Risiko, dass bei einer nicht fachgerechten Handhabung Treibhausgase entweichen oder Stickstoff in Boden oder Grundwasser austreten können, was als ökologisch nachteilig zu bewerten ist. Somit sind bestimmte Regeln zu beachten. Ob eine fachgerechte und ordnungsgemäße Verwertung erfolgt, liegt in der Verantwortung der Eigenkompostierenden, die tatsächlich im Stande sein müssen, eine sachgerechte und umweltfreundliche Kompostbewirtschaftung das ganze Jahr über durchzuführen (Menzel et al., 2015).

Die Kompostierung biologisch abbaubarer Kunststoffe auf dem eigenen Kompost im Garten ist grundsätzlich zugelassen, sofern die Produkte als „gartenkompostierbar“ zertifiziert sind (Burgstaller et al., 2018). Es sei zu erwähnen, dass Zertifizierungsprogramme wie z.B. „Ok compost HOME“ oder „DIN-Geprüft Gartenkompostierbar“ sich nicht explizit auf eine bestimmte Norm beziehen, sondern die technischen Anforderungen an ein Produkt auflisten, welches für den biologischen Abbau im Heimkompost vorgesehen ist (das Programm von „OK compost HOME“ diene jedoch als Grundlage mehrerer Normen im Bereich von biologischer Abbaubarkeit im Heimkompost) (TÜV Austria Belgium NV/SA, 2021). Leider gibt es in der Literatur nur wenige Testergebnisse hinsichtlich des biologischen Abbaus für die Heimkompostierung. Besonders die unterschiedlichen

Bedingungen auf Komposten machen eindeutige Aussagen schwierig. Aufgrund des geringen Abfallvolumens ist die Temperatur in einem Gartenkomposthaufen deutlich niedriger und weniger konstant als in der Umgebung einer industriellen Kompostierung. Die Gartenkompostierung ist daher ein schwierigerer und langsamerer Prozess, was den Abbau langsamer vorantreiben lässt (Meier, 2018).

3 Fragestellung und Ziel

Auch das EU-Projekt Bio-Plastics Europe beschäftigt sich mit nachhaltigen Strategien und Lösungen für biobasierte und biologisch abbaubare Kunststoffe. Die Materialeigenschaften der neuentwickelten Biokunststoffe sollen qualitativ mit denen herkömmlicher Kunststoffe vergleichbar sein und die Rohstoffe aus erneuerbaren Quellen stammen, die nicht mit der Lebensmittelversorgung in Konkurrenz stehen. Zudem sollen die Materialien biologisch abbaubar sein. Im Rahmen dessen werden Forschungsarbeiten und verschiedene Tests im Labor sowie in der Praxis durchgeführt, um die biologische Abbaubarkeit und die Auswirkungen der dabei freigesetzten Chemikalien besser verstehen zu können (Bio-Plastics Europe, ohne Datum).

Mit dieser Bachelorarbeit soll für diese Forschungsarbeiten ein Beitrag geleistet werden. Die allgemeine Datenlage über die biologische Zersetzung von Biokunststoffen im Gartenkompost ist noch sehr gering. Deswegen soll die Abbaubarkeit der durch Bio-Plastics Europe bereitgestellten neuen biologisch abbaubaren Kunststoffmaterialien im Heimkompost untersucht werden. Dazu wird der Zersetzungsgrad dieser Kunststoffe, die einer Kompostierungsumgebung im Heimkompost ausgesetzt sind, bestimmt. Als Vorlage wird die ISO 20200:2015 herangezogen und als Feldversuch umgewandelt. Es werden drei Arbeitshypothesen in Betracht gezogen:

Arbeitshypothese 1.a Nach einer festgelegten Zeit ist nach ISO 20200:2015 eine Zersetzung des Prüfmaterials zu erkennen. Ein hoher Zersetzungsgrad ist nachzuweisen.

Arbeitshypothese 1.b Nach einer festgelegten Zeit ist nach ISO 20200:2015 nur eine geringe Zersetzung des Prüfmaterials zu erkennen. Ein geringer Zersetzungsgrad ist nachzuweisen.

Arbeitshypothese 1.c Nach einer festgelegten Zeit ist nach ISO 20200:2015 keine Zersetzung des Prüfmaterials zu erkennen. Der Zersetzungsgrad ist gleich null.

Zudem wird geprüft, ob beim biologischen Abbauprozess Schadstoffe freigesetzt werden. Hierzu werden zwei weitere Hypothesen in Betracht gezogen:

Arbeitshypothese 2.a Nach einer festgelegten Versuchszeit sind keine vom Prüfmaterial freigesetzten Schadstoffe im Kompost nachzuweisen.

Arbeitshypothese 2.b Nach einer festgelegten Versuchszeit sind vom Prüfmaterial freigesetzte Schadstoffe im Kompost nachzuweisen

4 Material und Methoden

4.1 Zu testende Kunststoffe

Von dem Forschungsprojekt Bio-Plastics Europe wurden der HAW Hamburg vier Materialien ausgehändigt, deren biologische Abbaubarkeit unter Kompostierungsbedingungen zu testen ist. Die Biokunststoffe sind für unterschiedliche Anwendungsbereiche vorgesehen und basieren auf verschiedenen Ausgangsstoffen sowie Herstellungsprozessen.

- BPE-AMF-PLA (Bio-Plastics Europe-Agriculture Mulch Film-PLA)
- BPE-RP-PLA (Bio-Plastics Europe-Riched Packaging-PLA)
- BPE-SP-PBS (Bio-Plastics Europe-Soft Packaging- PBS)
- BPE-T-PHBV (Bio-Plastics Europe-Toys-PHBV)

Poly lactide (PLA)

Als Ausgangsstoff für Bioplastik findet weltweit vor allem biologisch abbaubare Stärke wie PLA Verwendung (Burgstaller et al., 2018). Zur Produktion von PLA wird zunächst die natürlich vorkommende Milchsäure mittels Fermentation hergestellt. Diese biogene Hydroxysäure wird dann in einem weiteren Schritt in einem industriellen Fertigungsprozess zur Polymilchsäure polymerisiert. PLA ist demnach ein Polyester. Für die Herstellung existieren bereits kontinuierliche Verfahren, womit PLA kostengünstig produziert werden kann. Weitere Vorteile des Materials sind die Transparenz, hohe Festigkeit und Thermoplastizität. PLA wird überwiegend für kurzlebige Verpackungsfolien verwendet, aber auch in der Bauindustrie, Technik, Optik und im Automobilbau. Zudem wird PLA im medizinischen und pharmazeutischen Bereich eingesetzt. Als Nachteil von PLA ist wohl die niedrige Glasübergangstemperatur zu nennen, die insbesondere amorphe Materialien aufweisen und die für PLA meist zwischen 55 und 65 °C angegeben wird. Die Schmelztemperatur liegt bei 150 - 160 °C (Türk, 2014).

Nach Aussagen des Forschungsprojekts Bio-Plastics Europe soll das verwendete PLA vollständig biobasiert sein. Als Ausgangsstoffe dienen Maisstärke, Zuckerrohr, Zuckerrüben und Tapioka. Es soll über eine geringe Barrierewirkung verfügen, zudem steif und transparent sein und hat, genau wie das auf dem Weltmarkt bereits verwendete PLA, nur eine geringe Hitzebeständigkeit. Das von Bio-Plastics Europe kreierte PLA soll zukünftig in der Landwirtschaft als Mulchfolie sowie als Hartverpackung verwendet werden (Bio-Plastics Europe, ohne Datum).

Polybutylensuccinat (PBS)

PBS ist ein linearer aliphatischer Polyester mit guten mechanischen Eigenschaften, die mit denen von Polypropylen verglichen werden (Türk, 2014). Die sehr niedrige Glasübergangstemperatur liegt zwischen -45 und -32 °C und der Schmelzpunkt wird bei 114 °C angegeben. PBS wird häufig für Verbundwerkstoffe eingesetzt, z.B. als Material in der Automobilbranche für Innenbauteile. Als Synthesebaustein für PBS dient Bernsteinsäure, die gegenwärtig überwiegend auf petrochemischer Basis hergestellt wird. Sie kann aber ebenfalls auf fermentativem Weg mit Hilfe bestimmter Bakterien produziert werden (Türk, 2014).

Bio-Plastics Europe gibt an, dass das von ihnen hergestellte PBS ebenso wie das PLA aus Maisstärke, Zuckerrohr und Zuckerrüben gewonnen wird. Es wird noch der Hinweis auf weitere Ausgangsstoffe gegeben, die jedoch nur unter dem allgemeinen Begriff Biomasse aufgeführt sind. Als Eigenschaften werden Hitzebeständigkeit und Flexibilität aufgeführt und es soll sich gut mit anderen biobasierten Polymeren mischen lassen. Es ist gedacht, das PBS für Weichverpackungen einzusetzen (Bio-Plastics Europe, ohne Datum).

Poly(hydroxybutyrat-co-hydroxyvalerat)-Copolymere (PHBV)

PHBV gehört zu der Stoffklasse der Polyhydroxyalkanoate (PHA) (Türk, 2014). PHA wurden schon 1925 beschrieben und sind wie Polymilchsäure biogene Polyester. Im Gegensatz zur Polymilchsäure werden sie allerdings vollständig von Bakterien in die Form der Polymere synthetisiert. Daher sind im Gegensatz zu PLA keine Katalysatoren erforderlich. Dies führt grundsätzlich zu Biokunststoffen hoher Reinheit, die deshalb für die Forschung interessant sind und auch im Hinblick auf werkstoffliche Nutzung zum Vorteil sind. Reines Polyhydroxybutyrat (PHB) ist ein thermoplastischer Polyester, dessen physikalische Eigenschaften mit denen von Polypropylen (PP) verglichen wird. Allerdings ist das Material wesentlich spröder als PP und in reiner Form nur schwer zu verarbeiten, da Schmelzpunkt und Zersetzungspunkt sehr nah beieinander liegen (Glasübergangstemperatur bei etwa 4 °C, Schmelzpunkt bei 175 °C). Durch die Einführung von PHBV-Copolymeren mit noch längeren Seitenketten lassen sich die Anwendungseigenschaften deutlich verbessern. Die Kristallinität, der Schmelzpunkt und die Glasübergangstemperatur sinken. So lässt sich das Material besser verarbeiten, es wird auch bei niedrigeren Temperaturen nicht so schnell spröde, die Steifigkeit wird geringer, Flexibilität und Zähigkeit nehmen zu (Türk, 2014).

Das PHBV wird von dem EU-Projekt vollständig biobasiert hergestellt. Als Ausgangsstoffe werden ebenfalls Maisstärke, Zuckerrohr, Zuckerrüben und Biomasse angegeben. Das thermoplastische Produkt soll zur Herstellung von Spielzeug dienen (Bio-Plastics Europe, ohne Datum).

4.2 Grundlage des Testverfahrens ISO 20200:2015

Seit den 90er-Jahren sind Laborverfahren zur Prüfung der biologischen Abbaubarkeit von Kunststoffen etabliert (Burgstaller et al., 2018). Wie in 2.7 erwähnt, sind für die einzelnen Umweltkompartimente entsprechend angepasste Prüfverfahren entwickelt worden und als standardisierte Verfahren verfügbar. Die ISO 20200:2015 beschreibt ein vereinfachtes Testverfahren, um den Zersetzungsgrad von Kunststoffen, die einer Kompostierungsumgebung im Labormaßstab ausgesetzt sind, zu bestimmen. Dazu wird das Prüfmaterial in kleine Stücke geschnitten, deren Maße von der Dicke des Prüfmaterials abhängig sind (ISO 20200:2015, Absatz 7.1). Die verwendete Feststoffmatrix, unter die das Prüfmaterial gemischt wird, besteht aus einem künstlich hergestellten Feststoffabfall, der mit einem fertig kompostierten Kompost aus einer kommunalen oder industriellen Kompostierungsanlage versetzt ist (ISO 20200:2015, Absatz 5). Bei einer thermophilen Inkubationsperiode verläuft die Prüfung bei $(58 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ für mind. 45 und max. 90 Tage. Eine mesophile Inkubationsperiode hat ebenfalls eine Höchstdauer von 90 Tagen und verläuft bei $(25 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ (ISO 20200:2015, Absatz 7.3 und 7.4). Die Kompostierungsreaktion wird überwacht. Während der Prüfung muss der künstliche Abfall zu Kompost werden. Die zu berücksichtigenden Anzeigeparameter wie Geruch, äußere Erscheinung und chemische Analyse sind sowohl subjektiv als auch objektiv zu beschreiben (ISO 20200:2015, Absatz 9). Am Ende der Prüfung wird der Zersetzungsgrad auf Grundlage der Kunststoffpartikel berechnet, die auf einem Sieb mit einer Maschenweite von 2 mm wiedergefunden werden können. Das wiedergefundene Kunststoffmaterial wird als nicht zersetzt, das durch die Siebe hindurchgegangene Material wird als zersetzt betrachtet (ISO 20200:2005, Absatz 10).

4.3 Versuchsaufbau

In den durchgeführten Labortests werden optimale und konstante Umgebungsbedingungen durch Parameter wie Temperatur, pH-Wert, Sauerstoffversorgung, Nährstoffgehalt eingestellt und ein hohes Verhältnis von Prüfmaterial zu Inokulum geschaffen, welches so in der Natur nicht vorkommt. Das hat den Nachteil, dass keinerlei Informationen über die Abbaubarkeit in natürlicher Umwelt unter realen Bedingungen geliefert werden. Für diese Arbeit wird nun ein Prüfverfahren entwickelt, welches auf realistischen Bedingungen des Heimkomposts basiert.

Es wird ein Heimkomposter auf einem Freigelände einer Gärtnerei in Hamburg Kirchwerder platziert. Zu Beginn der Prüfung wird ein Feststoffabfall zusammengestellt und mit einem Reifkompost einer privaten Hauskompostierung versetzt. Von den vier Prüfmaterialien werden jeweils zwei Proben in den Kompost untergemischt. Die Prüfdauer wird anhand der Entwicklung des Bioabfalls festgelegt. Die

Versuchszeit sollte mind. 6 Wochen betragen, um die mind. Prüfdauer der ISO 20200:2015 von 45 Tagen nahezu abzudecken. Im Abstand von sieben Tagen wird der Kompostierungsprozess beobachtet, wobei auf Geruch und äußere Erscheinung geachtet wird. Der Kompost wird neu durchmischt, um eine gute Durchlüftung zu gewährleisten. Gegebenenfalls wird Wasser hinzugefügt. Bei Versuchsbeginn sind Proben des künstlichen Abfalls zu nehmen, sowie weitere im Abstand von 14 Tagen. Diese werden eingefroren, um nach Abschluss des Prüfverfahrens zu untersuchen, ob sich Schadstoffe freigesetzt haben. Hierbei werden Konzentrationen von PCBs und PAKs untersucht. Die Prüfmaterialien werden alle sieben Tage vorsichtig dem Kompost entnommen, um die möglich eintreffende Zersetzung bildlich zu dokumentieren. Zum Ende des Verfahrens werden die Prüfmaterialien dem Kompost entnommen und im Labor untersucht. Der Zersetzungsgrad wird nach ISO 20200:2015 bestimmt. Zudem erfolgt eine Materialanalyse mittels einer Differenzkalorimetrie (DSC).

4.4 Durchführung

4.4.1 Auswahl Komposter

Der aerobe Kompostierungsprozess fand in einer sogenannten Komposttrommel der Marke Westfalia statt. Die Entscheidung fiel hauptsächlich auf dieses Kompostmodell, weil durch die Bauweise eine einfache Handhabung gegeben ist (auf Abbildung 1 veranschaulicht).



Abbildung 1: Verwendete Komposttrommel (Westfalia Werkzeugcompany GmbH & Co KG, 2021)

Die Komposttrommel lässt sich einfach aufbauen und versetzen. Sie verfügt über zwei an einem Gestell frei hängende Behälter, die Trommeln. Diese lassen sich für eine Durchmischung des Kompostes einfach drehen. Eine mühsame Kompostumschichtung war somit nicht erforderlich. Die Trommeln bestehen aus UV-beständigem Kunststoff und haben ein Innenvolumen von jeweils 70 Litern. Es handelt sich um ein geschlossenes System, welches mit schmalen Belüftungsöffnungen versehen ist.

Der Kompostfibel des Umweltbundesamtes ist zu entnehmen, dass bei einer herkömmlichen Heimkompostierung (nach einmaligem Umsetzen) nach ca. drei bis vier Monaten der Frischekompost (angerotteter Kompost) fertig ist. Ein Reifekompost (Humusdünger) ist demnach im Sommerhalbjahr

nach ca. vier bis sechs Monaten, ansonsten nach etwa sechs bis maximal zwölf Monaten reif (Menzel et al., 2015). Der Hersteller der für diesen Versuch verwendeten Komposttrommel garantiert einen schnelleren Zersetzungsprozess von drei bis vier Wochen, da sich im Inneren hohe Temperaturen einstellen sollen und regelmäßiges Drehen der Trommeln eine gute Durchmischung und somit eine ausreichende Sauerstoffversorgung schaffen soll (Westfalia Werkzeugcompany GmbH & Co KG, 2021). Sämtliche Gartenratgeber im Internet schätzen den Zersetzungsprozess für Kompostierungsvorgänge im Thermokomposter sowie im Trommelkomposter auf mind. vier bis sechs Wochen. Die Kompostfibel weist jedoch darauf hin, dass bislang noch nicht nachgewiesen werden konnte, ob die genutzte Kompostart einen Einfluss auf die Beschleunigung des Kompostprozesses hat (Menzel et al., 2015).

4.4.2 Künstlicher Feststoffabfall

Die verwendete Feststoffmatrix bestand größtenteils aus einem nachgebildeten Feststoffabfall sowie zum Teil aus echtem Bioabfall aus zwei Privathaushalten.



Abbildung 2: Reifkompost aus privater Kompostierung

Dieses Feststoffgemisch wurde mit einem reifen Kompost aus einer privaten Heimkompostierungsanlage versetzt. Für das Gemisch wurde sich grob an den Vorgaben der ISO 20200:2015 orientiert.



Abbildung 3: Kleintierstreu als Sägemehlersatz

Da es sich um einen Feldversuch unter realen Bedingungen handelt, richteten sich die Anteile der einzelnen Komponenten nicht nach ihrer Trockenmasse. Statt des vorgegebenen Sägemehls wurden Sägespäne für die Kleintierhaltung verwendet.



Abbildung 4: Benutztes Kleintierstreu

Die genormte Feststoffmatrix soll zu einem geringen Anteil aus Harnstoff bestehen. Daher wurde auch ein Teil von Kaninchen benutztem Kleintierstreu hinzugefügt.



Abbildung 5: Kartoffelstücke als Stärkeanteil

Der Stärkeanteil wurde mit kleingeschnittenen Kartoffeln abgedeckt. Die restlichen von der Norm vorgegebenen Anteile wurden nicht beachtet. Stattdessen diente der Ratgeber für eine fachgerechte Heimkompostierung des Umweltbundesamtes als Orientierung.



Abbildung 6: Bioabfall aus Privathaushalt

Dieser empfiehlt ein besonders vielfältiges Ausgangsmaterial. Für den Versuch wurde daher im Vorwege im Privathaushalt der Bioabfall gesammelt und verwendet.



Abbildung 7: Grasschnitt

Zudem wurde noch Grasschnitt hinzugegeben. Das Gemisch umfasste ein Volumen von etwa 60 Litern. Nach dem Ansetzen wurde es mit Wasser befeuchtet. Die genauen Angaben zu den verwendeten Materialien sind im Anhang 8.1 der Tabelle 7 zu entnehmen. Der Kompostierungsprozess wurde wöchentlich überwacht.

Der Versuch wurde im Spätsommer, am 18. August 2021 gestartet. Da nach der festgelegten Mindestdauer von sechs Wochen optisch keine Zersetzung des Prüfmaterials auszumachen war, wurde die Prüfdauer verlängert. Ab Mitte September fielen die Außentemperaturen bereits stark ab.

Deswegen fiel die Entscheidung, die Komposttrommeln nachzufüllen und das Volumen der Feststoffmatrix wieder zu vergrößern (Angaben im Anhang 8.1, Tabelle 8). So bestand die Möglichkeit, dass sich im Inneren des Komposts höhere Temperaturen entwickeln konnten, um einen fortlaufenden Zersetzungsprozess zu gewährleisten. Der Feuchtigkeitsgehalt wurde nach Versuchsende anhand der entnommenen Kompostproben bestimmt.

4.4.3 Prüfmateriale

Das Prüfmateriale wurde im Labor der HAW eingewogen (Anhang 8.2, Tabelle 14). Nach ISO 20200:2015 ist das Prüfmateriale nach bestimmten Angaben zu zerkleinern. In diesem Prüfverfahren wurde darauf verzichtet, da unter realen Bedingungen mit größeren Kunststofffragmenten im Kompost zu rechnen ist. Daher wurde das Prüfmateriale jeweils auf eine Größe von etwa 7 x 4 cm gebracht und in ein Drahtnetz verkleidet unter den zusammengesetzten Bioabfall gebracht. Das Drahtnetz diente der Aufnahme der fragmentierten Kunststoffteile. Nach der Norm gilt ein Kunststoffmateriale als biologisch zersetzt, wenn es eine Größe kleiner 2 mm aufweist. Daher wurde ein Drahtnetz mit einer dichten Maschenweite von 0,5 mm verwendet, um möglichst viele Teile des zersetzten Prüfmateriales zu sichern. Allerdings war unklar, ob genügend Substanz des Bioabfalls durch die geringe Maschenweite hindurch dringen kann. Um zu gewährleisten, dass die an der aeroben Zersetzung beteiligten Organismen gut an das Prüfmateriale gelangen können, wurde zeitgleich ein weiterer Versuch in dem zweiten Behälter der Komposttrommel durchgeführt, bei dem das Prüfmateriale in ein Drahtnetz mit einer größeren Maschenweite von 2 mm eingeschlagen wurde. Von den vier unterschiedlichen Prüfmateriale lagen also jeweils zwei Proben vor, was insgesamt acht Proben ergab. Um die verschiedenen Materialien zu kennzeichnen, wurden den Drahtumschlägen unterschiedlich viele Ecken mit einem Seitenschneider entfernt (auf den Abbildungen 8 und 9 ersichtlich). Die grobmaschigen Drahtnetze mit den enthaltenen Proben wurden in den Behälter 1 gegeben (linke Trommel mit grünem Deckel) und die feinmaschigen Drahtnetze in den Behälter 2 (rechte Trommel mit schwarzem Deckel). Die Behältnisse sind auf der Abbildung 10 dargestellt. Die Proben wurden sorgfältig mit der Feststoffmatrix vermischt.



Abbildung 8: Prüfmateriale eingeschlagen in grobmaschigem Drahtnetz bei Versuchsbeginn



Abbildung 9: Prüfmateriale eingeschlagen in feinmaschigem Drahtnetz bei Versuchsbeginn



Abbildung 10: Komposttrommel befüllt mit frisch zusammengestelltem Feststoffabfall

4.4.4 Überwachung der Temperatur

Um den Temperaturverlauf im Inneren des Kompostes zu überwachen, wurde ein Hobo Datenlogger verwendet. Dieser wurde in den Behälter 2 (rechte Komposttrommel mit dem schwarzen Deckel) gegeben. Es wurde kontinuierlich alle 6 Stunden die Temperatur gemessen und aufgezeichnet. Zu Versuchsende konnte der Datenlogger über die HOBOWare-Software ausgelesen werden.

4.4.5 Prüfdauer

Nach insgesamt 8 Wochen wurde der Versuch am 13.10.2021 beendet, da in dieser Jahreszeit die Außentemperaturen so niedrig sind, dass der Kompostierungsprozess stagnierte.

4.4.6 Bestimmung des Zersetzungsgrads

Nach Abschluss der Kompostierung wurde das Prüfmaterial den Behältern entnommen. Im Labor der HAW wurden die Kunststoffmaterialien aus den Drahtnetzen genommen und vorsichtig mit destilliertem Wasser gereinigt. Nachdem das Material vollständig an der Luft getrocknet war, wurde es eingewogen (Werte der Tabelle 14 im Anhang 8.2 zu entnehmen). Der Zersetzungsgrad wurde nach ISO 20200:2015 wie folgt bestimmt:

$$D = \frac{m_i - m_r}{m_i} \cdot 100$$

Dabei ist

- m_i die anfängliche Trockenmasse des Probenmaterials,
- m_r die Trockenmasse des restlichen, durch Sieben erhaltenen Probenmaterials (in diesem Fall die Fragmente, die sich im Drahtnetz befinden könnten).

4.4.7 Materialanalyse

Die Materialanalyse wurde mit einer Dynamischen Differenzkalorimetrie (Englisch: Differential Scanning Calorimetry (DSC)) durchgeführt (Gerät Netsch DSC 214 Polyma der Firma Mettler-Toledo), da sich dieses Prüfverfahren als bevorzugt geeignet und effektiv für die Kunststofftechnik etabliert hat. Die DSC gehört zu der thermischen Analyse, bei der allgemeine physikalische und chemische Eigenschaften einer Substanz als Funktion der Temperatur oder der Zeit gemessen werden können (Frick & Stern, 2006). In dem Verfahren werden Umwandlungen aufgrund von Temperaturdifferenzen zwischen einer Probe und einem Referenzmaterial registriert. Die Probe und die Referenz durchlaufen dazu ein Temperatur-Zeit-Programm, wobei die Substanzen jeweils durch einen individuellen Wärmestrom auf der gleichen Temperatur gehalten werden. Findet eine physikalische oder chemische Umwandlung in der Probe statt, dann unterscheidet sich auch der Wärmestrom von dem der Referenz (Schwedt et al., 2016).

Probenvorbereitung

Für die Messung ist eine einfache Präparation der Proben erforderlich (Frick & Stern, 2006). Nur wenige Milligramm des zu untersuchenden Substrats werden benötigt, um einen hohen Informationsgehalt zu erhalten. Um Schmelz- und Kristallisationsvorgänge zu untersuchen, wird eine Probeneinwaage von 5 bis 10 mg empfohlen. Hochempfindliche Kalorimeter benötigen dagegen nur eine Probenmasse von 1 bis 5 mg. Wenn der Glasübergang untersucht werden soll, ist eine

Probenmasse von 15 bis 20 mg notwendig. Die Einwaage der Probenmenge sollte in jedem Fall eine geringe Toleranz von nur $\pm 0,1$ mg aufweisen (Frick & Stern, 2006).

Für diese Arbeit standen Schmelz- und Kristallisationsvorgänge im Fokus. Daher wurde für den Versuch jeder Probe eine Masse von ca. 6 mg mittels eines Stanzeisens entnommen und in die Messzellen überführt (Einwaage im Anhang 8.2, Tabellen 15 - 16). Die Massetoleranz betrug dabei bis zu $\pm 0,3$ mg.

DSC-Aufbau und Ablauf

Die Messzelle besteht aus einem Ofen, der mit Temperatursensoren ausgestattet ist (Frick & Stern, 2006). Der gesamte Ofenraum wird mit Stickstoff gespült, um eine definierte, inerte Atmosphäre zu erreichen. Um die spezifischen Materialeigenschaften der Proben zu untersuchen, wird jede Probe üblicherweise zweimal mit einer definierten Heizrate über den Schmelzpunkt aufgeheizt und einmal abgekühlt. Nach DIN ISO 11357 wird eine Heiz-/Kühlrate von 10 K/min für die Messung von Schmelz- und Kristallisationsvorgängen empfohlen und für die Untersuchung von Glasübergängen eine Heiz/Kühlrate von 20 K/min. Um den Schmelzvorgang bzw. den Kristallisationsvorgang eines Polymers erfassen zu können, sollte die Probe mindestens 20 °C über den zu erwartenden thermischen Endeffekt aufgeheizt werden. Dabei ist Vorsicht geboten, da eine zu hohe Temperatur eine ungewollte Zersetzung hervorrufen kann. Daher sollte die Endtemperatur gleich der Schmelzverarbeitungstemperatur der Probe gewählt werden. Die Starttemperatur sollte mindestens 50 °C unterhalb des ersten zu erwartenden Effektes liegen (Frick & Stern, 2006).

In dieser Arbeit wurde für alle Proben dasselbe Temperaturprogramm angewendet. Dabei wurde sich an den Daten des Prüfmateri als PLA orientiert.

Tabelle 1: Temperaturprogramm DSC, Quelle: HAW Ökotoxikologie Labor, 2021

Vorgang	Temperatur [°C]	Heizrate [K/min]	Zeit [min]
Start	25	-	16
1. Abkühlung	0	10	3
1. Aufheizung	200	10	20
1. Temperatur halten	200	-	3
2. Abkühlung	0	10	20
2. Aufheizung	0	-	10
2. Temperatur halten	200	10	20
3. Abkühlung	30	50	3

DSC-Auswertung

Mit Hilfe der geeigneten Software des Geräteherstellers lassen sich die DSC-Messkurven der kalorischen Effekte quantitativ erfassen. Mittels der DSC-Prüfung können durch die spezifischen Materialkennwerte amorphe und teilkristalline Kunststoffproben identifiziert und charakterisiert werden (Frick & Stern, 2006). Die DSC-Messkurve beschreibt den Wärmestrom im betrachteten Temperaturbereich als Funktion der Temperatur. Die Abweichungen der Kurve von der Basislinie basieren auf thermische Umwandlungen durch endo- oder exotherme Reaktionen (Frick & Stern, 2006).

In der Abkühlphase wird das Erstarrungsverhalten der Probe durch eine Kristallisationskurve beschrieben (Frick & Stern, 2006). Bei einer Unterkühlung können Kristallisationszentren ausgebildet werden, die temperaturabhängig sind. Diese wachsen mit einer bestimmten Geschwindigkeit zu Kristalliten, die dann wiederum Kristalllamellen bilden. Ab einer bestimmten Temperatur beginnen die kristallinen Bereiche zu schmelzen. Die Probe wandelt sich vom festen in den flüssigen Zustand um. Peakweite und Peakhöhe kennzeichnen die Verteilung der Kristallite. Der Energiebetrag, der zum Schmelzen der kristallinen Anteile benötigt wird, entspricht dem Kristallisationsgrad der jeweiligen Probe. Sprunghafte Änderungen werden durch Glasübergänge hervorgerufen. Die Glasübergänge lassen sich nur bedingt sensitiv messen, da die Änderung der Wärmekapazität am Glasübergang nur sehr gering sein kann. Unterhalb der Glasübergangstemperatur verhält sich ein Polymer spröde, oberhalb zeigt sich ein duktileres Verhalten. In der Nähe des Schmelzbereichs nimmt die mechanische Festigkeit eines Polymers durch die zunehmende Beweglichkeit der Molekülketten stark ab. Anhand von zusätzlichen Glasübergängen oder Schmelzpeaks können Verunreinigungen identifiziert werden (Frick & Stern, 2006).

Durch einen biologischen Abbau können Risse und Poren an der Oberfläche des Probenmaterials entstehen. Dies führt zu Veränderungen der mechanischen Eigenschaften, wie Festigkeit und Bruchdehnung (Frick & Stern, 2006). Zudem hat der Polymerabbau auch eine Änderung der Molmasse zur Folge. Wird solch eine geschädigte Probe mittels DSC untersucht, ist ein verändertes Schmelz- und Kristallisationsverhalten zu messen. Verkürzte Molekülketten kristallisieren bei höheren Temperaturen. Hat in einem Kunststoffmaterial eine biologische Zersetzung stattgefunden, sollte sich die DSC-Kristallisationskurve der Probe zu höheren Temperaturen hin verschieben, da in der Abkühlphase die Erstarrung früher einsetzt und auch früher endet. Der Peak der DSC-Kristallisationskurve wäre entsprechend der Polymerschädigung schmal und intensiv ausgeprägt. Zudem besitzen Proben mit einer kleineren Molmasse eine höhere Schmelzenthalpie, womit das Peakmaximum im Vergleich zu höhermolekularen Proben größer ist (Frick & Stern, 2013).

4.4.8 Schadstoffanalyse

Die Proben sollen auf PCBs und PAKs untersucht werden. Da es sich hierbei um leicht flüchtige organische Verbindungen handelt, wurde als analytisches Trennverfahren eine Gas-Chromatographie verwendet und eine Massenspektrometrie angeschlossen. Bei diesem Verfahren wird der Analyt über das Probenaufgabeteil in eine Kapillarsäule gegeben. Dort werden die Substanzen mithilfe eines Trägergases durch die Säule transportiert, wo bei einer festgelegten Temperatur die Trennung stattfindet. Die Länge der Säule bestimmt die Anzahl der Trennstufen. Die verwendete Kapillarsäule hat eine Länge von über 20 m, so ist es möglich, die Substanzen hochauflösend voneinander zu trennen. Die getrennten Substanzen werden ionisiert und passieren nach dem Verlassen der Säule in der Gasphase nacheinander einen Detektor, der die Messung des Masse-Ladungs-Verhältnisses ausgibt. Doch vor der Messung mittels Gas-Chromatographie mit Massenspektrometrie-Kopplung (GC-MS Messung) müssen die Proben in die für diese Trennmethode geeignete Form überführt werden. Die Konzentration der Analyten muss erhöht werden, um die Empfindlichkeit und Selektivität für die Trennung und Messung zu verbessern. Zudem muss die Probe aufgereinigt werden, um die Lebensdauer des chromatographischen Systems zu verlängern und die qualitative und quantitative Analytik zu verbessern (Schwedt et al., 2016).

Im Folgenden werden die einzelnen Schritte, die zur Probenaufbereitung durchgeführt wurden, beschrieben. Die Werte der Einwaagen und sonstigen Messungen dieser Schritte sind in den Tabellen 10 - 12 im Anhang unter Punkt 8.1 einzusehen.

Beschleunigtes Extraktionsverfahren (ASE)

Die Extraktion ist eines der ältesten Verfahren der Probenaufbereitung. Hierbei wird der Analyt von der Feststoffmatrix getrennt (Schwedt et al., 2010). Für diese Arbeit wurde eine beschleunigte Lösemittelextraktion ausgeführt, die Accelerated Solvent Extraction (ASE). Die ASE findet vor allem in der Umweltanalytik für Boden- und Sedimentuntersuchungen Anwendung. Die eingestellten Arbeitsbedingungen führen die Extraktion unter einem hohen Druck und hohen Temperaturen durch. So können die Reaktionskinetik und die Desorption der Analyten von der Matrix beschleunigt werden.

Für die Extraktion wurde eine ASE des Herstellers DIONEX verwendet und unter hohem Druck von 140 bar und einer Temperatur von 100 °C ausgeführt.

Die Kompostproben wurden zuvor ca. 72 Stunden bei 60 °C wärmegetrocknet (zur Trocknung von Sedimentproben wird allgemein eine Gefriertrocknung empfohlen. Leider war zur Zeit der Durchführung die Gefriertrocknung der HAW defekt). Für jede Kompostprobe wurde eine Extraktionszelle vorbereitet (mit Hexan gespült und ausgestattet mit einer Fritte), die mit etwa 4 g

Kompost befüllt und mit Diatomeenerde aufgefüllt und durchmischt wurde. Eine Extraktionszelle wurde allein mit Diatomeenerde befüllt und diente als Blindwert. Als interner Standard wurden jeder Probe 100 ng PAK und 100 ng PCB absolut als Standardverdünnung mit einer jeweiligen Konzentration von 1 ng/µl hinzu pipettiert (als Lösungsmittel dient Hexan). Die Verwendung eines internen Standards dient dem Nachweis von PCB- und PAK-Verlusten, die während der Probenvorbereitung oder der Messung auftreten können. Die Entschwefelung während des Extraktionsvorganges wurde mit Kupfer vollzogen. Dazu wurden Kupferspäne zweimal mit einer HCl-Lösung aufgereinigt und mit Reinstwasser, dann mit Aceton und anschließend mit Hexan jeweils mehrfach gespült.

Die Extraktionszellen wurden in die ASE platziert. Nach dem Extraktionsvorgang wird das Extrakt in ein Probenglas überführt. Jede Probe durchläuft in der ASE zwei Extraktionszyklen. Also mussten im Vorwege pro Probe zwei Probengläser vorbereitet und mit gereinigten Kupferspänen befüllt werden.

Abfiltrieren

Nach der Extraktion mussten zuerst die Kupferspäne abfiltriert werden. Dazu wurden die Extrakte in eine Bakerbond-Säule gegeben, die vorher mit Hexan gewaschen wurde. Danach wurden die ASE-Probengläser mit Hexan und anschließend mit Aceton jeweils mehrfach gespült. Die Lösungsmittel wurden dann ebenfalls filtriert. So konnten in den Gläsern verbliebene Rückstände der Extrakte gewonnen werden. Die Säule wurde noch mit Hexan und Dichlormethan gespült.

Einengung mittels Rotationsverdampfer

Im nächsten Vorgang wurden die Extrakte im Rotationsverdampfer eingeeengt.

Ähnlich wie eine gewöhnliche Destillationsapparatur besteht ein Rotationsverdampfer aus einem geheizten Kolben zum Verdampfen, einem Kühler für die Kondensation und einem Auffangkolben. Die zu destillierende Flüssigkeit wird durch die Rotation des Kolbens bewegt. So entsteht in der Innenwand des Kolbens ein Flüssigkeitsfilm mit einer großen Oberfläche, wodurch die Destillation beschleunigt wird. Die Temperatur im Heizbad, der Unterdruck in der Apparatur und die Kühlung müssen aufeinander abgestimmt werden, damit die Lösungsmittel zügig, aber ohne Siedeverzüge und ohne Energie- und Materialverluste entfernt werden können (Weber, 2015).

Der Kolben wurde etwa zur Hälfte in das mit Wasser befüllte Heizbad getaucht, was mit einer Temperatur von 45 °C beheizt wurde. Der Druck in der Apparatur wurde so eingestellt, dass der Siedepunkt der Lösungsmittel auf ca. 40 °C reduziert wurde. Die Druckeinstellungen wurden einer vorgefertigten Labortabelle entnommen. Vorerst wurde der Unterdruck auf 600 mbar eingestellt, um den Siedepunkt des verwendeten Lösungsmittels Aceton zu erhalten, der bei einer Temperatur von 40 °C bei 556 mbar Unterdruck liegt. Dann wurde der Unterdruck langsam in 50er-Schritten bis auf

300 mbar gesenkt, um den Siedepunkt von Hexan bei 335 mbar Unterdruck abzudecken. Der Kolben rotierte dabei mit 150 Umdrehungen pro Minute. Die Kühlung wurde auf 8 °C eingestellt. Die Proben wurden auf ein Volumen von etwa 1 ml (Augenmaß) eingeengt.

Festphasenextraktion (SPE)

Zur Aufreinigung der Proben wurde eine Festphasenextraktion durchgeführt. Diese ist bekannt für die Anwendung von Umweltproben, bei denen häufig große Volumina mit kleinen Analyt-Konzentrationen extrahiert werden müssen (Schwedt et al., 2010). Dazu wurden zwei Bakerbond-Säulen mit einem Adapter verbunden, nachdem die Böden der Säulen mit Fritten versehen worden sind. Als Festphase diente der oberen Säule 3 g Al₂O₃ und der unteren 3 g Siliciumdioxid. Zudem wurde der oberen Säule noch eine Fritte oberhalb des Adsorbens zugeführt, um Partikel abzutrennen. Zuerst wurde das Adsorbens mit Hexan als Lösemittel gewaschen. Danach wurde die Probenlösung langsam auf die obere Säule pipettiert. Genau wie bei der Kupferabtrennung konnten mit Waschrissen unerwünschte Matrixkomponenten aus den ASE-Gläsern entfernt werden. Die Elution erfolgte mit 12 ml Hexan und mit 40 ml eines Gemisches 10/90 Dichlormethan zu Hexan.

Weitere Einengung mittels Rotationsverdampfer

Die Proben wurden nach der Festphasenextraktion wieder mittels Rotationsverdampfer eingeengt. Dieses Mal wurden die Proben auf gleiche Weise wie im vorherigen Durchgang auf ein Volumen von etwa 800 µl eingeengt.

GC-MS Messung

Für die GC-MS-Messung müssen die Extrakte in getönte Vials überführt werden. Dies erfolgte mit einer Hamilton-Spritze, da die genaue Menge eines jeden Extraktes notiert werden muss. Jedes der Vials muss exakt auf 800 µl aufgefüllt werden. Es wurde für die GC-MS Messung eine Kalibrierung durchgeführt, wofür vier Standards angesetzt wurden. Zuerst wurden die internen und externen Standards 1:10 verdünnt. Die V1-Verdünnungen wurden dann verwendet, um die V2-Verdünnungen herzustellen. Mit V0, V1 und V2 wurden die vier Standards (L1-4) angesetzt. Die GC-Vials wurden in richtiger Reihenfolge (erst die Standards, dann die Proben) auf ein Rack für die Probenmessung des Gas-Chromatographen gesetzt. Vor der Probenmessung erhält man einen Anfangsstandard, nach der Probenmessung einen Endstandard. Die Angaben zu den PAK- und PCB-Standards sind im Anhang unter 8.1, Tabelle 13 aufgeführt.

5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Überwachung der Temperatur

In einer industriellen Kompostierungsanlage werden Temperaturen von bis zu 80 °C erreicht. Es ist sogar vorgeschrieben, über einen Zeitraum von mindestens zwei Wochen eine Mindesttemperatur von 55 °C zu halten, um eine Hygienisierung zu gewährleisten. Diese hohen Temperaturen werden in der Heimkompostierung in der Regel nicht erreicht, bzw. nicht über solch einen langen Zeitraum (Menzel et al., 2015). Im Verlauf dieser Arbeit haben sich im Kompost Temperaturen bis zu 39,1 °C eingestellt. Die Durchschnittstemperatur während der gesamten Prüfdauer belief sich allerdings nur auf 18,6 °C, womit die Temperatur deutlich unter der in der Norm vorgegebenen Temperatur der mesophilen Inkubationsperiode von (25 ± 2) °C lag. Die Begründung dafür kann nicht in der häufigen Durchmischung des Bioabfalls liegen. Die Höchsttemperaturen wurden nach den einzelnen Durchmischungen an unterschiedlichen Tagen erreicht. So wurde nach einer Durchmischung schon am Folgetag eine Höchsttemperatur innerhalb einer Woche bis zur nächsten Durchmischung erreicht. In anderen Prüfwochen haben sich die Maximalwerte der Kompostinnentemperaturen erst nach vier oder sechs Tagen eingestellt. Die niedrige Durchschnittstemperatur des Komposts kann zum einen am zu hohen Feuchtigkeitsgehalt des Bioabfalls liegen, zum anderen an den zu der Prüfzeit herrschenden niedrigen Außentemperaturen.

Die Komposttemperaturen werden im Folgenden mit den Außentemperaturen verglichen. Dafür wurden die Daten der HAW-Wetterstation in Hamburg Bergedorf herangezogen, da diese präzise sind und sich die Station mit einem Abstand von etwa 12 km relativ nah an dem Standort des Komposts befindet. Der Kurvenverlauf auf der Abbildung 11 macht deutlich, dass die Temperaturen im Inneren des Kompostes (hier in Grün dargestellt) in Abhängigkeit der Außentemperatur (in Blau) verlaufen, jedoch kontinuierlich höher sind. Im August haben sich im Kompost Temperaturen eingestellt, die durchschnittlich ca. 5 °C über der Außentemperatur lagen. Im September lag die Komposttemperatur im Durchschnitt noch 3,5 °C, im Oktober nur noch 3 °C über der durchschnittlichen Außentemperatur. Siehe hierzu auch Tabelle 2.

Wie bereits erwähnt, fielen die Außentemperaturen Ende September stark ab. Nach sechs Wochen Prüfdauer wurde das Volumen des Bioabfalls vergrößert, damit sich im Inneren des Komposts leichter höhere Temperaturen einstellen können. Die Ergebnisse zeigen, dass dies nicht eingetroffen ist. In der Woche vor der Auffüllung lag die Durchschnittstemperatur im Inneren des Komposts 11,7 °C höher als die der Außentemperatur. In der Woche nach der Auffüllung lag die Komposttemperatur nur noch 8,7 °C über der Außentemperatur.

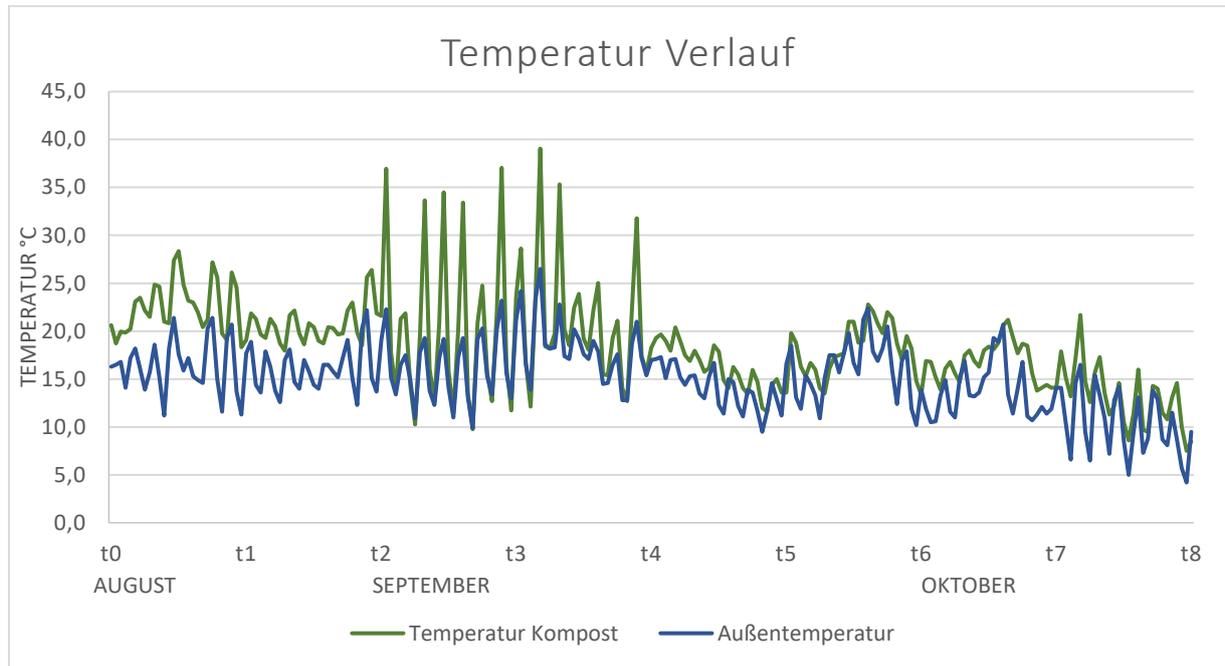


Abbildung 11: Temperatur Verlauf Vergleich Außen- und Komposttemperatur

Tabelle 2: Temperatur Vergleich Außen- und Komposttemperatur

Temperatur Vergleich		
	Außentemperatur in °C	Temperatur Kompost in °C
Höchstwert	26,5	39,1
Mindestwert	4,2	7,5
Mittelwert Prüfzeit	15,1	18,6
Mittelwert Aug.	16,3	21,5
Mittelwert Sep.	15,8	18,8
Mittelwert Okt.	11,5	14,9

5.2 Überwachung des Kompostierungsprozesses

Obwohl sich keine hohen Temperaturen über einen längeren Zeitraum im Kompost eingestellt hatten und der Wassergehalt mit 65 - 75 % weit über dem der Norm vorgegebenen Gehalt von 55 % lag (siehe Abbildung 12), ist ein guter Kompostierungsprozess zu verzeichnen (der Wassergehalt wurde zu Versuchsende aus den getrockneten Kompostproben bestimmt. Die genauen Werte dazu sind im Anhang 8.1 in Tabelle 9 zu finden).

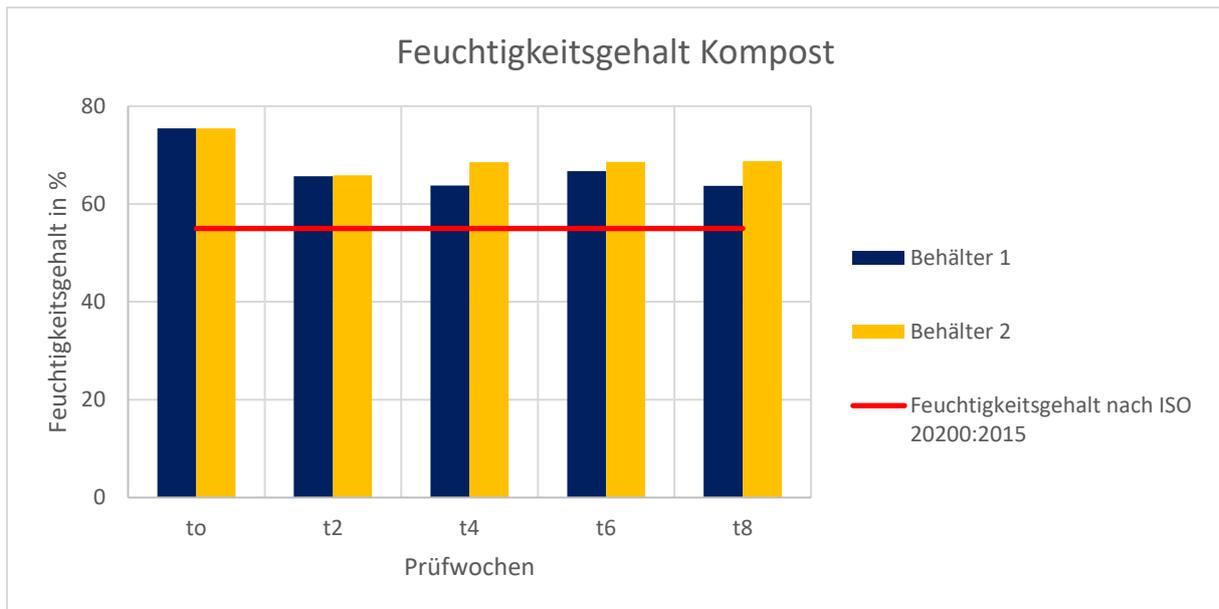


Abbildung 12: Feuchtigkeitsgehalt während der gesamten Prüfdauer

Laut Norm muss während der Prüfung der künstliche Abfall zu Kompost werden. Während des Kompostierungsprozesses ist es möglich, eine genaue Folge von spezifischen Erscheinungen wahrzunehmen. Dieser Ablauf war während des Versuchs zu erkennen, was einen gut voranschreitenden Kompostierungsprozess unter Beweis stellt.

Prüfung t₁

Am Tag 7 war ein leicht säuerlicher Geruch wahrzunehmen. Der Bioabfall hatte stark an Volumen verloren und bereits eine leicht dunklere Färbung angenommen. Pilzgeflechte waren auf der Oberfläche sichtbar (auf Abbildung 14 rechts unten im Bild sichtbar).

Prüfung t₂

Am Tag 14 war ein erdartiger Geruch festzustellen, der sich während der gesamten Prüfdauer auch nicht mehr stark änderte. Der Kompost hatte nun eindeutig eine bräunliche Färbung angenommen. Einzelne Fragmente des Inhaltes, wie z.B. Kartoffelstücke und Gemüseabfall, waren allerdings noch gut wahrzunehmen.

Prüfung t₃ bis t₅

In den darauffolgenden drei Wochen setzte sich dieser Prozess fort. Der künstliche Bioabfall nahm eine immer dunklere Färbung an. Die einzelnen Fragmente waren immer weniger auszumachen, so dass das Gemisch homogener wirkte. Das Volumen änderte sich nur noch langsam. Auf der Oberfläche des Komposts waren jede Woche viele Keimlinge sichtbar. Außerdem waren immer mehr

Makroorganismen vorzufinden. Vor allem Kellersasseln und viele Regenwürmer bewohnten den Kompost.

Prüfung t_6

Nach sechs Wochen, zum Ende des Monats September, fielen die Temperaturen. Der Kompost hatte insgesamt stark an Volumen verloren. Es wurde ein neuer Bioabfall zusammengestellt und unter den alten, bereits gut zersetzten, gemischt.

Prüfung t_7 und t_8

Ab Woche 7 konnte kein Zersetzungsprozess mehr erkannt werden. Das neue Kompostgemisch war unverändert und deutlich von dem alten Kompost zu unterscheiden. Grund dafür waren die niedrigen Temperaturen. Ab Oktober sind die Außentemperaturen auf fast 4 °C gesunken.

Die optische Aufzeichnung des Kompostierungsprozesses ist in den Abbildungen 13 bis 18 einzusehen.



Abbildung 13: Kompost, Zeit: t_0



Abbildung 14: Kompost, Zeit: t_1



Abbildung 15: Kompost, Zeit: t_2



Abbildung 16: Kompost, Zeit: t_6



Abbildung 17: Kompost mit neuem Gemisch, Zeit: t_6



Abbildung 18: Kompost, Zeit: t_7

5.3 Materialuntersuchung

5.3.1 Optische Untersuchung

Die optische Untersuchung der Prüfmaterien zeigt, dass keine eindeutige Zersetzung der Kunststoffe stattgefunden hat. Im Laufe der Zeit ist immer mehr von dem Bioabfall durch die Maschen des Drahtnetzes gedrungen. So wie erwartet war zu beobachten, dass in die Proben mit den

grobmaschigen Ummantelungen der Bioabfall schneller und vor allem in größeren Mengen gedungen ist. Es waren Feuchtigkeitsspuren auf den Prüfmaterialien auszumachen. Die Proben nahmen wohl aufgrund dessen eine etwas gewellte Form an. Die größte Veränderung war an dem Prüfmaterial BPE-T-PHBV zu beobachten. Dieses war am Ende der Prüfdauer vor allem an den Seitenrändern dunkel gefärbt und wies am Rand Bruchstellen auf. Um diese optische Erscheinung zu verdeutlichen, sind ausgewählte Aufnahmen beigefügt (Abbildungen 19 - 21). Die Aufnahmen der restlichen Proben sind im Anhang unter 8.3 auf den Abbildungen 33 - 57 einzusehen. Im Folgenden werden weitere Auffälligkeiten beschrieben, die bei den einzelnen Proben im Verlauf des Versuchs registriert wurden.

BPE-AMF-PLA

Auf dem Prüfmaterial BPE-AMF-PLA, das mit einem grobmaschigen Drahtnetz ummantelt war, konnten nach zwei Wochen weiße Spuren auf einer Fläche von etwa 1 x 1 cm wahrgenommen werden. Diese weißen Spuren könnten erste Andeutungen einer Zersetzung sein. Im Verlauf der Prüfzeit nahm die Anzahl der Spuren leicht zu. Auf dem Prüfmaterial, welches mit feinmaschigem Drahtnetz versehen wurde, konnten zum Ende der Prüfzeit vereinzelt solcher weißen „Knabberspuren“ verzeichnet werden. Auffällig war, dass auf dem BPE-AMF-PLA bei jeder Prüfung viele Kleinlebewesen entdeckt wurden. In Woche 5 wurde beobachtet, dass ein Regenwurm das grobmaschige Drahtnetz zum Prüfmaterial durchdrungen hat.

BPE-RP-PLA

Ähnlich wie bei dem BPE-AMF-PLA wurden immer wieder Makroorganismen beobachtet, die sich auf dem Prüfmaterial niedergelassen hatten. Ansonsten waren keine weiteren Auffälligkeiten zu beobachten.

BPE-SP-PBS

Bei der ersten Prüfung waren auf dem BPE-SP-PBS in der feinmaschigen Ummantelung feine Pilzsporen zu erkennen. Ab der zweiten Prüfung waren auf dem Material in der grobmaschigen Umhüllung ebenfalls kleine weiße Spuren zu erkennen, deren Anzahl sich im Verlauf der Prüfdauer vermehrte. Auf dem Material, das sich in der feinmaschigen Ummantelung befand, konnte ab der zweiten Prüfung eine leicht dunklere Verfärbung wahrgenommen werden. Nach fünf Wochen konnte hier auch eine Entwicklung von weißen Spuren beobachtet werden.

BPE-T-PHBV

Das BPE-T-PHBV wies optisch die wohl auffälligsten Veränderungen auf. Nach einer Prüfdauer von sechs Wochen waren Veränderungen an den Seitenrändern sichtbar. Diese waren dunkel gefärbt und es waren Riss- bzw. Bruchstellen zu erkennen.



Abbildung 19: BPE-T-PHBV, Maschenart: fein, Zeit: t1



Abbildung 20: BPE-T-PHBV, Maschenart: fein, Zeit: t5



Abbildung 21: BPE-T-PHBV gereinigt, Maschenart: fein, Zeit: t8

5.3.2 Zersetzungsgrad

Die Messungen des Materials BPE-AMF-PLA ergeben negative Werte für den Zersetzungsgrad, welcher aufgrund des Gewichtsverlustes bestimmt wurde (vgl. Kapitel 4.4.6). Sie werden im Folgenden nicht in die Bewertung mit einbezogen (Werte in Tabelle 3 in Rot dargestellt). Grund für diese Ergebnisse könnte sein, dass das Prüfmaterial während der Versuchszeit viel Feuchtigkeit aus dem Kompost gezogen hat oder dass sich nach der Reinigung noch Feststoffpartikel an den Proben befanden.

Die weiteren Ergebnisse zum Zersetzungsgrad zeigen, dass sich die Materialien unter den Bedingungen dieses Versuchs kaum zersetzt haben. Den höchsten Zersetzungsgrad mit lediglich 8,74 % weist das Prüfmaterial BPE-T-PHBV auf, welches für den Versuch in einem grobmaschigen Drahtnetz verkleidet wurde. Das nächsthöchste Ergebnis liegt bei nur 1,36 % (BPE-T-PHBV in feinmaschiger Ummantelung).

Die weiteren Werte sinken bis auf < 1 % ab, der niedrigste Wert beläuft sich auf 0,34 % (PBE-RP-PLA in feinmaschiger Ummantelung). Alle Ergebnisse sind in den Tabellen 3 und 4 einzusehen.

Die folgenden Ergebnisse haben aufgrund der niedrigen Werte keine große Aussagekraft. Trotzdem sollten für diese Arbeit einzelne Vergleiche der Ergebnisse aufgeführt werden, um als Grundstein für mögliche Folgeversuche zu dienen.

Vergleicht man die einzelnen Prüfmaterialien, lässt sich erkennen, dass das Material BPE-T-PHBV den höchsten Zersetzungsgrad mit einem Mittelwert von 5,05 % aufweist, gefolgt von BPE-SP-PBS mit 0,93 % und PBE-RP-PLA mit einem Mittelwert des Zersetzungsgrades von nur 0,37 % (in Tabelle 5 ersichtlich).

Ein Vergleich der gewählten Maschenweite der Drahtnetze zeigt, dass die Prüfmaterialien in der grobmaschigen Ummantelung nur gering stärker zersetzt worden sind (siehe Tabelle 6). Dennoch ist zu empfehlen für zukünftige Versuche mit dem grobmaschigen Drahtnetz zu arbeiten.

Tabelle 3: Ergebnisse Zersetzungsgrad Prüfmaterial in grobmaschiger Drahtnetzverkleidung

Prüfmaterial, Maschenart der Ummantelung: grob			
Name	Gewicht t0 (Versuchsstart) in mg	Gewicht t8 (Versuchsende) in mg	Zersetzungsgrad in %
BPE-AMF-PLA	900,63	902,60	-0,22
PBE-RP-PLA	958,41	954,48	0,41
BPE-SP-PBS	1289,59	1278,19	0,88
BPE-T-PHBV	1331,82	1215,37	8,74

Tabelle 4: Ergebnisse Zersetzungsgrad Prüfmaterial in feinmaschiger Drahtnetzverkleidung

Prüfmaterial, Maschenart der Ummantelung: fein			
Name	Gewicht t0 (Versuchsstart) in mg	Gewicht t8 (Versuchsende) in mg	Zersetzungsgrad in %
BPE-AMF-PLA	1112,61	1121,26	-0,78
PBE-RP-PLA	1120,99	1117,20	0,34
BPE-SP-PBS	1032,00	1021,87	0,98
BPE-T-PHBV	1187,24	1171,05	1,36

Tabelle 5: Mittelwert der Ergebnisse des Zersetzungsgrads

Mittelwert des Zersetzungsgrads (Maschenart grob und fein)	
Prüfmaterial	Zersetzungsgrad in %
PBE-RP-PLA	0,37
BPE-SP-PBS	0,93
BPE-T-PHBV	5,05

Tabelle 6: Vergleich Mittelwert Zersetzungsgrad der unterschiedlichen Maschenweiten

Vergleich Maschenart	
Maschenart	Zersetzungsgrad in %
grob	3,35
fein	0,89

5.3.3 Materialanalyse mittels DSC

Um einen möglichen Zersetzungsprozess anhand der DSC-Untersuchung nachweisen zu können, werden die Ergebnisse des Probenmaterials mit denen des Rohmaterials verglichen. Es lassen sich dabei keine sichtbaren Veränderungen messen. Das Schmelzverhalten der untersuchten Materialien hat sich durch die Kompostierung nicht sichtlich verändert. Die Kristallisationskurven haben sich nicht zu höheren Temperaturen hin verschoben, die Peakmaxima der einzelnen Proben sind im Vergleich zu den Referenzproben nicht gestiegen.

In der DSC-Kurve des Rohmaterials BPE-AMF-PLA zeigt sich in der ersten Aufheizung (in Abbildung 22 in Gelb dargestellt) gleich zu Beginn eine Glasübergangsstufe und bei 43,7 °C ein charakteristischer endothermer Glasübergang. Bei ca. 70 °C setzt die Nachkristallisation ein. Ab etwa 130 °C beginnen die kristallinen Bereiche des untersuchten Polymers zu schmelzen. Die Probe wandelt sich vom festen in den flüssigen Zustand um. Die zweite Aufheizung erlaubt in der DSC die Bestimmung der spezifischen Materialkennwerte. Hier in schwarz dargestellt, wird in der zweiten Aufheizphase nur noch die erste Glasübergangsstufe gemessen. Es findet auch keine Nachkristallisation statt. Zum Ende hin ist ein sogenanntes bimodales Schmelzverhalten zu erkennen.

Beim Vergleich von Abbildung 22 mit Abbildung 23, auf der die DSC-Messkurve des Probenmaterials aus dem Kompost abgebildet ist, zeigt sich deutlich, dass keine Veränderungen stattgefunden haben.

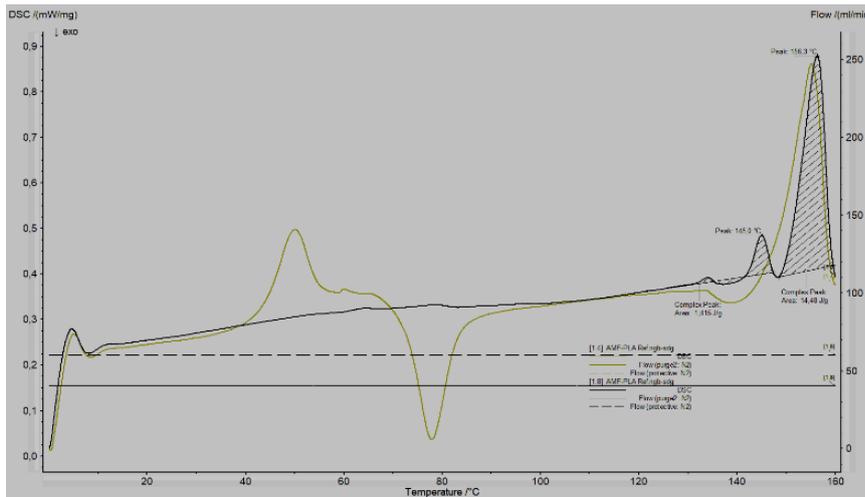


Abbildung 22: DSC-Messkurve BPE-AMF-PLA Referenz

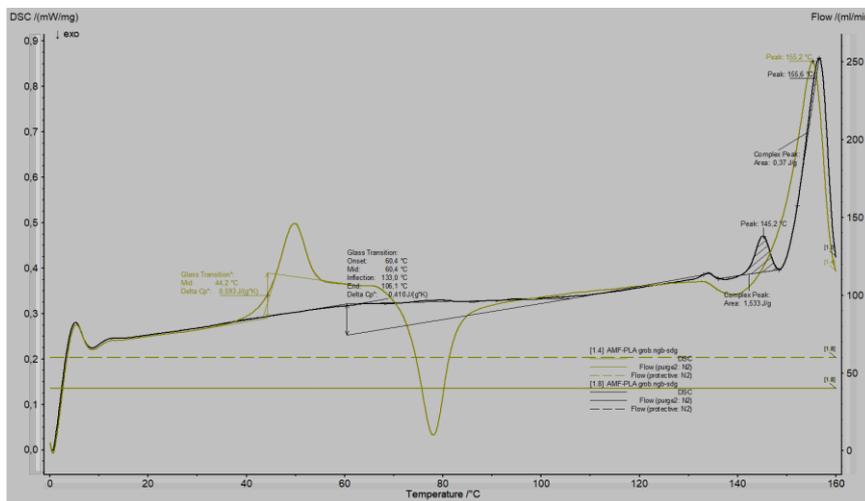


Abbildung 23: DSC-Messkurve BPE-AMF-PLA, Maschenart: grob

Wie anhand des Zersetzungsgrad zu erkennen ist, hat die Probe des Materials BPE-AMF-PLA an Gewicht zugenommen. Das könnte durch eine Feuchtigkeitsaufnahme verursacht sein. Diese kann ebenfalls die kalorischen Eigenschaften beeinflussen (Frick & Stern, 2013). In diesem Fall sollte im Kurvenverlauf der ersten Aufheizung im Gegensatz zum DSC-Verlauf zu einer trockenen Probe ein endothermer Peak festzustellen sein, der durch das Verdampfen der Feuchtigkeit hervortreten kann. Hinzu sollten Unterschiede im Nachkristallisations- und Schmelzverhalten auszumachen sein. Die Polymerketten werden durch Anlagerung von Wasser unflexibler, was die Nachkristallisation verschlechtert. Nachdem das Wasser in der ersten Aufheizphase verdunstet ist, erhöht sich das freie Volumen in der Struktur und die Beweglichkeit der Moleküle steigert sich. Daraus folgt, dass sich das Kristallisationsverhalten verbessert, was sich auf den Nachkristallisationsprozess auswirkt. Ebenfalls können Veränderungen in der Glasübergangstemperatur festzustellen sein, die sich durch die

Anlagerung von Wasser zu geringeren Temperaturen verschiebt (Frick & Stern, 2013). Beruhen die Unterschiede zwischen der ersten und zweiten Aufheizung auf der Feuchtigkeit, so lassen sich trotzdem keine Unterschiede zwischen der Referenz messen. Somit lässt sich die Gewichtszunahme nicht durch Feuchtigkeitsaufnahme erklären.

Ein ähnliches Verhalten ist auch bei den Proben BPE-RP-PLA und BPE-SP-PBS wahrzunehmen (siehe Abbildungen 24 - 26). Die DSC-Kurven verzeichnen allerdings ein Schmelzverhalten bei niedrigeren Temperaturen als bei dem Material BPE-AMF-PLA. Es sind ebenfalls keine Abweichungen zwischen Referenz- und Prüfmaterial zu messen.

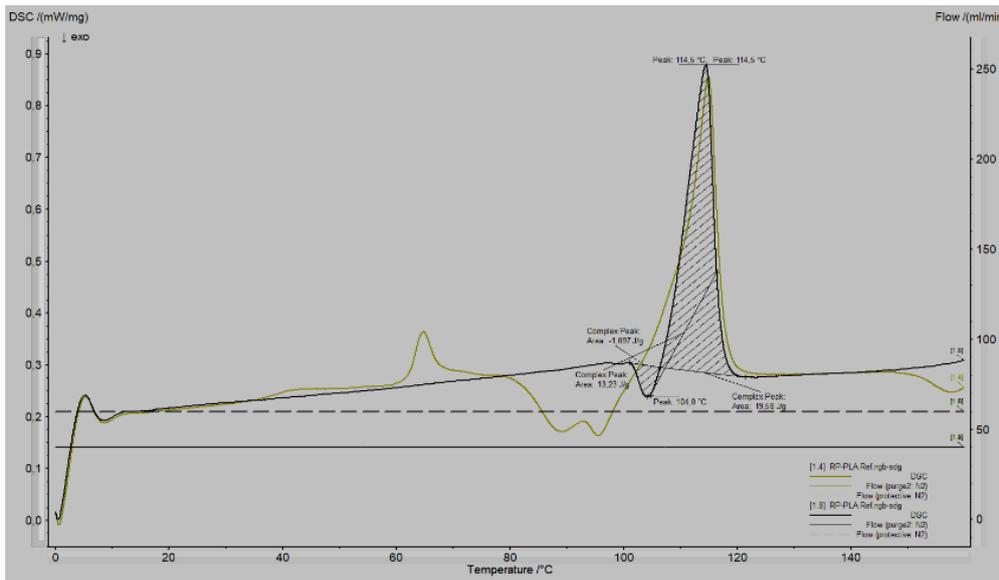


Abbildung 24: DSC-Messkurve BPE-RP-PLA Referenz

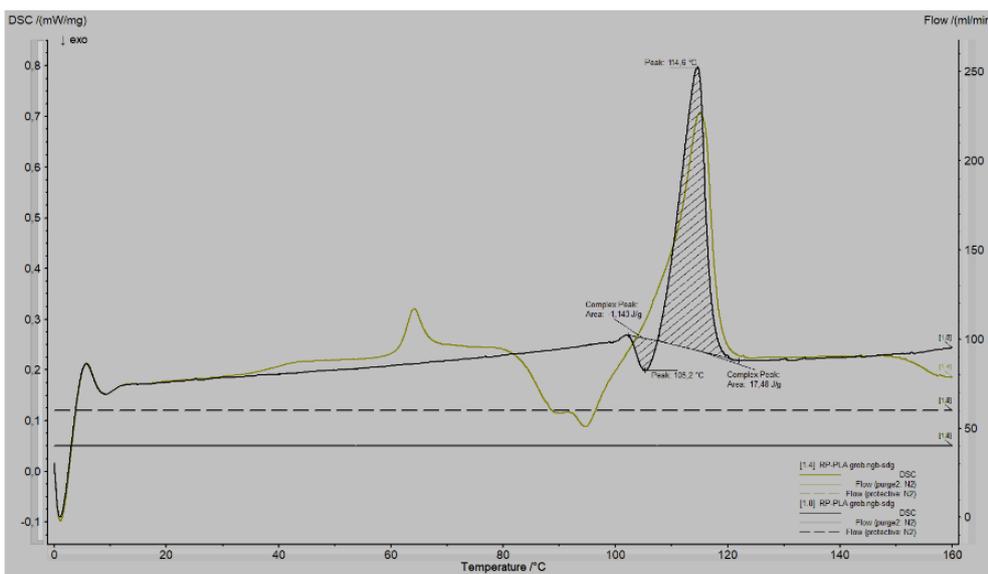


Abbildung 25: DSC-Messkurve BPE-RP-PLA, Maschenart: grob

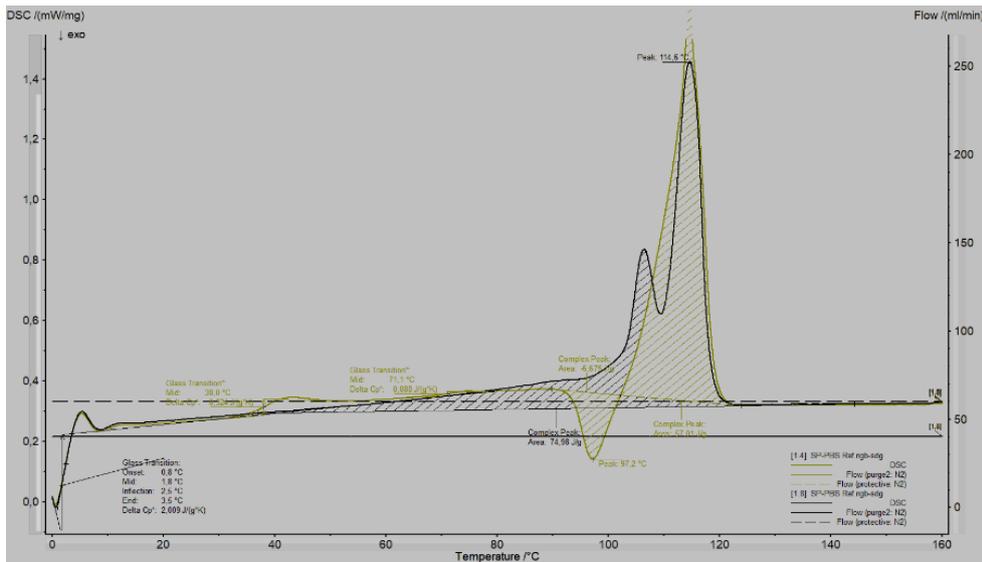


Abbildung 26: DSC-Messkurve BPE-SP-PBS Referenz

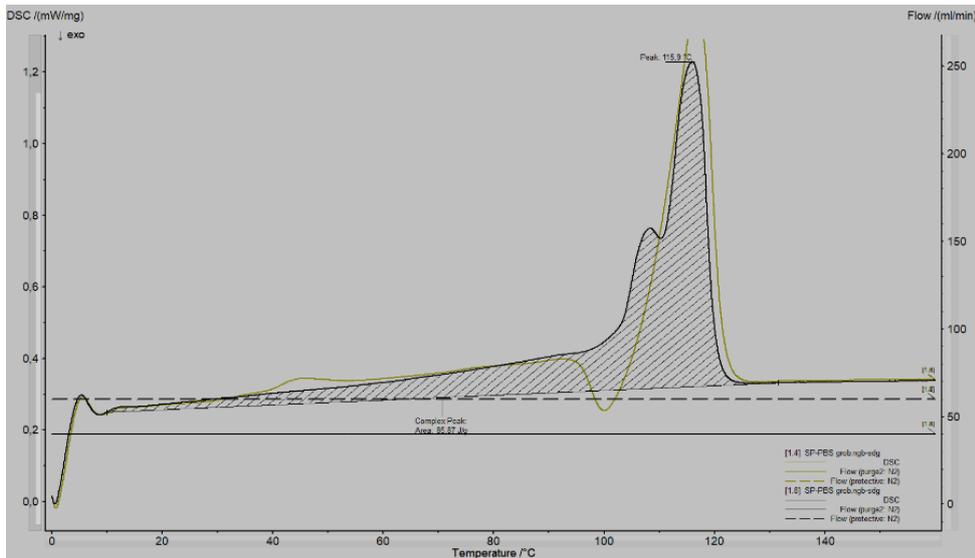


Abbildung 27: DSC-Messkurve BPE-SP-PBS, Maschenart: grob

Anhand der Messkurve des Materials BPE-T-PHBV (Abbildung 28) ist zu erkennen, dass das eingesetzte Temperaturprogramm individuell auf das Probenmaterial abgestimmt werden muss. Das Schmelzverhalten beginnt langsam bei etwa 150 °C. Der Schmelzpeak liegt außerhalb der eingesetzten Höchsttemperatur von 200 °C.

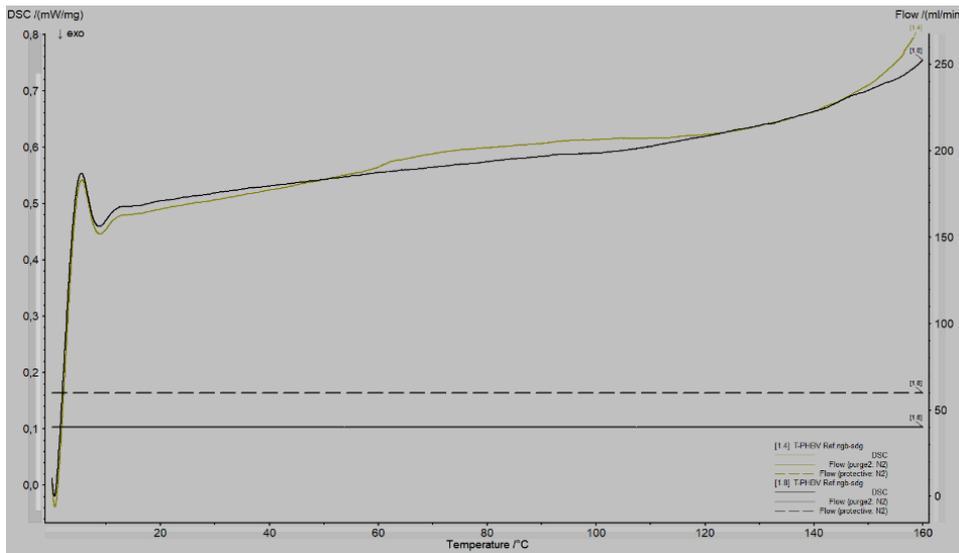


Abbildung 28: DSC-Messkurve BPE-T-PHBV Referenz

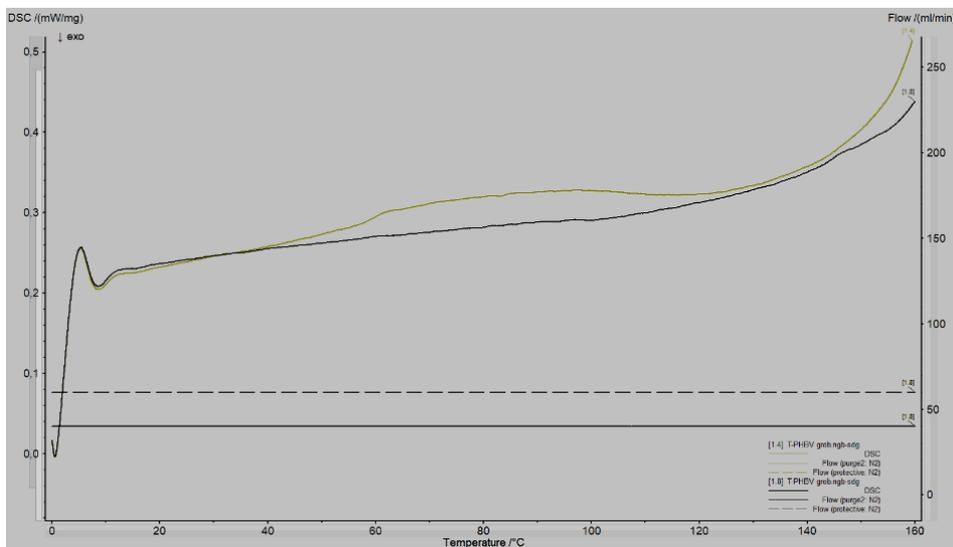


Abbildung 29: DSC-Messkurve BPE-T-PHBV, Maschenart: grob

5.4 Schadstoffuntersuchung

Die Untersuchung mittels Gas-Chromatographie ergab, dass keine PAKs in den Kompostproben nachzuweisen sind (Auswertung im Anhang unter 8.4, Tabellen 17 - 22, Daten GC-MS Messung unter 8.5, Tabelle 23). Lediglich 3 verschiedene PCBs wurden nachgewiesen. Hierbei handelt es sich um die PCBs 28, 101 und 138. Es wurden Mengen festgestellt, die unterhalb der Grenzwerte der Düngemittelverordnung sowie der Prüf- und Maßnahmenwerte der Bundesbodenschutzverordnung liegen. In den Abbildungen 30 bis 32 sind die einzelnen Schadstoffgehalte aufgelistet. Es werden jeweils die Proben aus den beiden Komposttrommeln miteinander verglichen. Behälter 1 beschreibt die Komposttrommel mit den Materialproben in der groben Drahtummantelung, Behälter 2 beschreibt die

Komposttrommel mit den Materialproben in der feinmaschigen Ummantelung. Innerhalb des Kompostierungszeitraums wurden sehr unterschiedliche Mengen an Schadstoffen nachgewiesen. Daraus lässt sich schließen, dass mit der Prüfzeit kein Anstieg des Schadstoffgehaltes festzustellen ist. Es kann keine explizite Aussage über den Vergleich der Kompostproben aus den unterschiedlichen Behältern getroffen werden. Somit muss es sich um eine natürliche Hintergrundbelastung handeln. Ein paar der Proben enthielten leicht erhöhte Schadstoffwerte. Es ist davon auszugehen, dass die festgestellten Schadstoffe von den Kompostbehältnissen ausgehen.

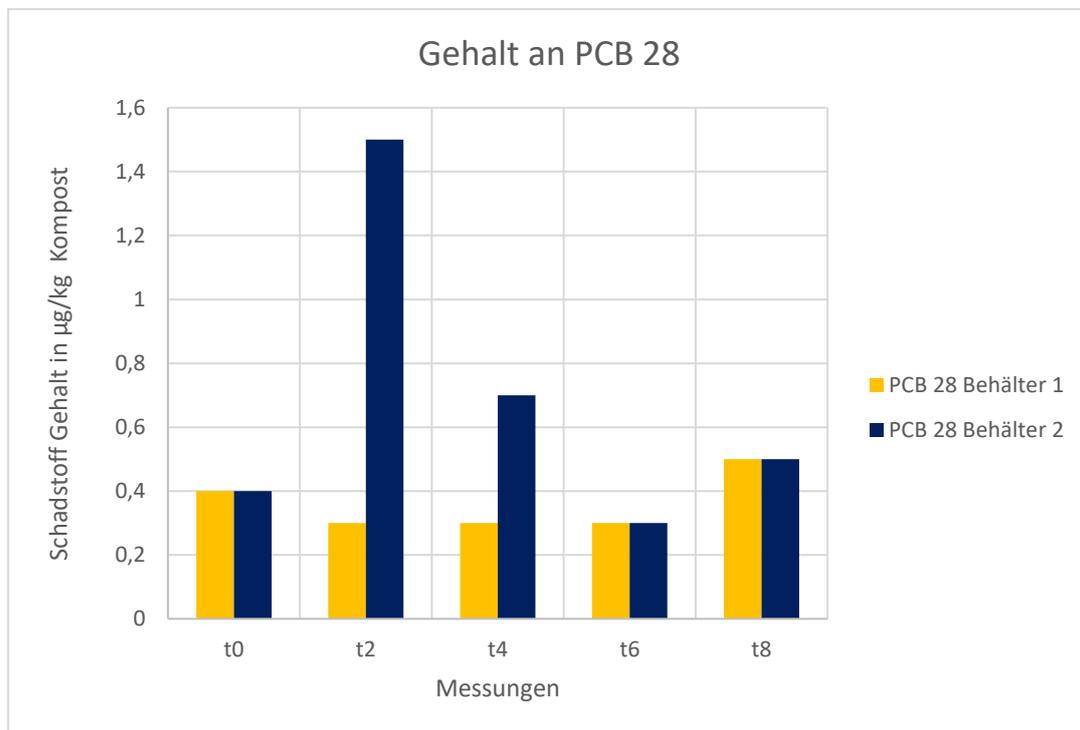


Abbildung 30: GC-MS Messung Kompostproben, PCB 28 Gehalt

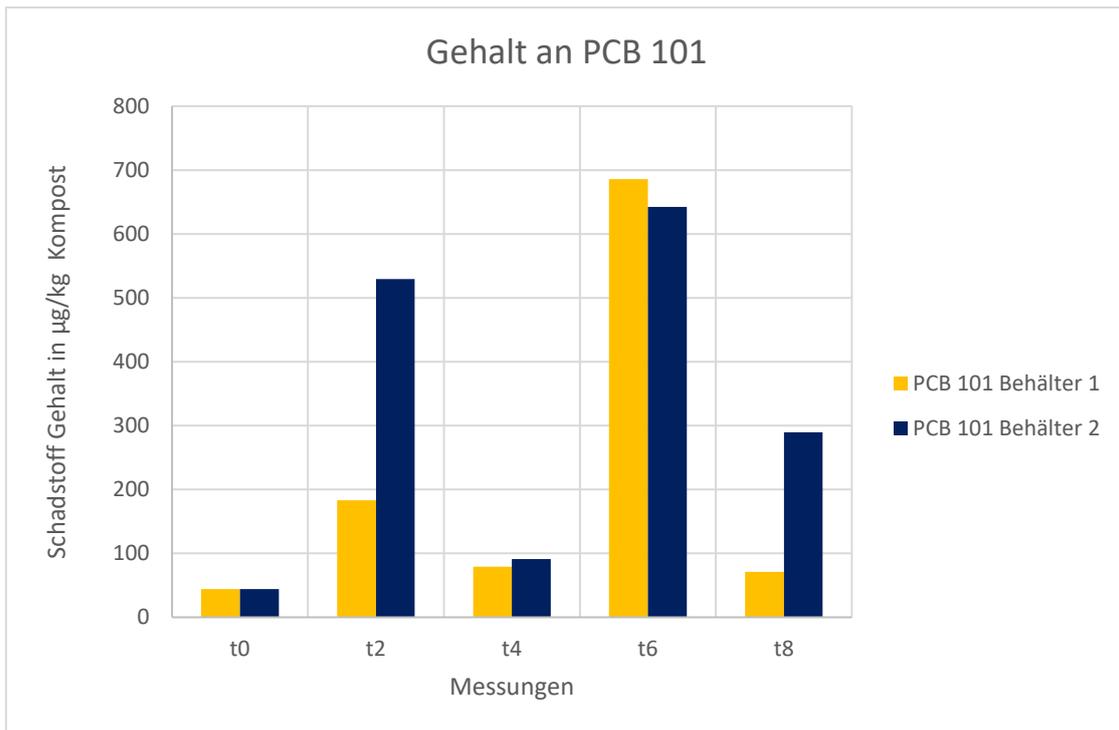


Abbildung 31: GC-MS Messung Kompostproben, PCB 101 Gehalt

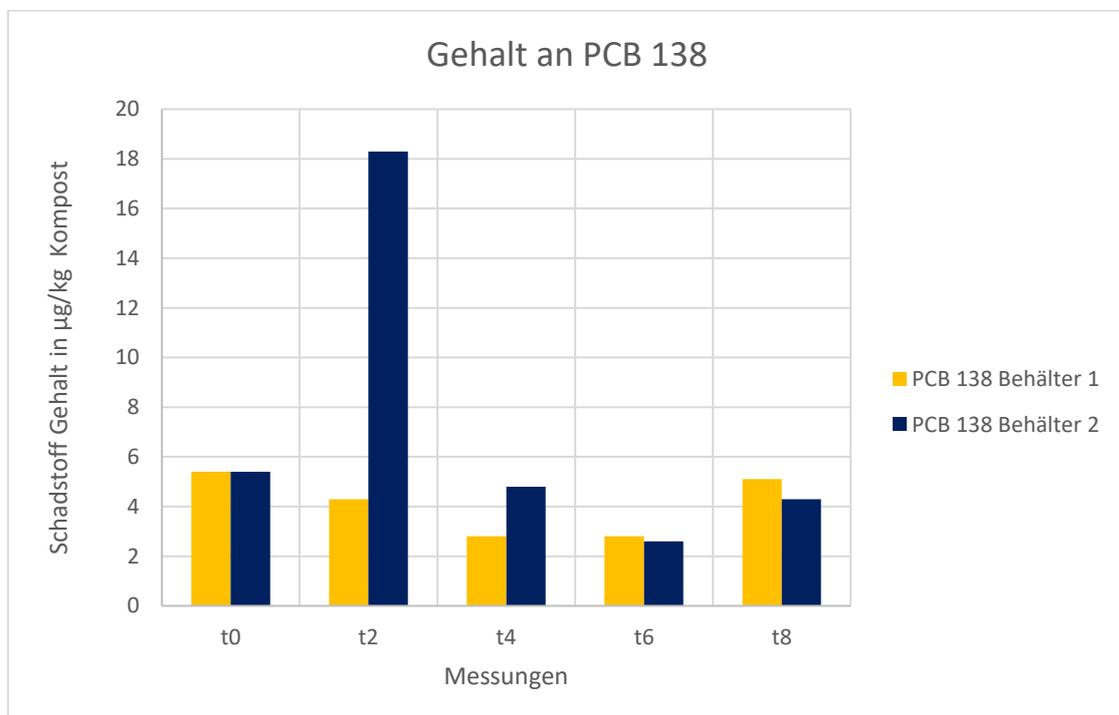


Abbildung 32: GC-MS Messung Kompostproben, PCB 138 Gehalt

6 Schlussfolgerung und Ausblick

Die Ergebnisse der durchgeführten Gartenkompostierung lassen darauf schließen, dass die Umwandlung des Versuchsaufbaus vom Labormaßstab auf reale Bedingungen als erfolgreich zu beurteilen ist. Die Werte der Kompostierungsparameter wie Temperatur, Feststoffzusammensetzung und Feuchtigkeit stimmen zwar unter realen Bedingungen nicht mit denen der Werte aus der ISO 20200:2015 überein. Trotzdem war ein guter Kompostierungsprozess zu beobachten, womit die Gültigkeit der Prüfung bewiesen werden kann und die Messergebnisse des Prüfmaterials anzunehmen sind. Diese besagen, dass nach einer festgelegten Prüfzeit von acht Wochen keine eindeutige Zersetzung des Prüfmaterials zu erkennen ist. Der Zersetzungsgrad ist nahe null. Daraus lässt sich schließen, dass die von dem Projekt Bio-Plastics Europe bereitgestellten Materialien nicht für den Heimkompost geeignet sind. Positiv ist zu vermerken, dass keine vom Prüfmaterial freigesetzten Schadstoffe im Kompost nachzuweisen sind.

Die Kompostierungszeit beträgt allerdings in vielen privaten Gärten länger als acht Wochen. Um zu prüfen ob mit Verlängerung der Kompostierungszeit eine höhere Desintegration auftreten würde, wurden im Anschluss dieser Arbeit Teile der Prüfmaterialien zurück in den Trommelkomposter gegeben. Die Messwerte werden in einer separaten Arbeit erfasst und ausgewertet.

Es ist darauf hinzuweisen, dass die Proben mit der Zeit nur noch schwer voneinander zu unterscheiden waren. Die Kennzeichnung durch Abtrennen der Ecken von den Ummantelungen wurde durch regelmäßiges Öffnen und Schließen stark beansprucht. Empfehlenswert für weiterführende Versuche ist eine gründlichere Probenpräparation. Um eine Feuchtigkeitsaufnahme des Prüfmaterials ausschließen zu können, sollte nach ISO 20200:2015 bei Versuchsbeginn sowie bei Versuchsende das Prüfmaterial wärmegetrocknet werden. Des Weiteren könnte während des Kompostierungsprozesses darauf geachtet werden, dass der Kompostinhalt kontinuierlich aufgefüllt wird. Dies würde der Realität im Gartenkompost entsprechen und ein größeres Volumen könnte höhere Temperaturen im Inneren des Komposters bewirken.

Zusammenfassend lässt sich feststellen:

Unter dem Aspekt der negativen Umweltauswirkungen von Kunststoffen scheinen die Produktion und der Gebrauch von Biokunststoffen ein guter Lösungsansatz zu sein. Die benötigte Biomasse kann aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnen werden, die nicht in Konkurrenz mit der Nahrungs- und Futtermittelherstellung stehen. Wird durch die Produktion kein hoher Verbrauch an Nutzfläche verzeichnet und werden keine Düngemittel und Pestizide eingesetzt, kann die Ökobilanz von Biokunststoffen besser als die von konventionellen Kunststoffmaterialien ausfallen. Vor allem

biologisch abbaubaren Kunststoffen wird eine bessere Umweltqualität nachgesagt, da solche Produkte durch Kompostierung das Potential des geschlossenen Kreislaufs und durch die Zertifizierungsrichtlinien strengere Schwermetallgrenzen und Ökotoxizitätstests aufweisen. Diese Arbeit zeigt allerdings, dass unter realen Umweltbedingungen die Abbaubarkeit in einem bestimmten Zeitrahmen nicht gewährleistet ist. Die Normen, auf denen die Zertifizierungen für biologische Abbaubarkeit von Kunststoffen basieren, sollten überarbeitet und an reale Kompostbedingungen angepasst werden.

Es lassen sich drei weitere Kritikpunkte aufführen:

1. Der Glaube, Biokunststoffe können aufgrund ihrer Abbaubarkeit in der Umwelt verbleiben, wo sie sich zersetzen, führt zu einem Anstieg des Littering. Je nach Umgebungsbedingungen kann der Abbau solcher Produkte mehrere Monate dauern. In dieser Zeit kann das Produkt ein Risiko für Mensch und Umwelt darstellen.

2. Die normierten Anforderungen an einen biologisch abbaubaren Kunststoff verlangen nur einen Zersetzungsgrad von 90 %. Partikel des biologisch abbaubaren Kunststoffs, die nach einer bestimmten Inkubationszeit kleiner als 2 mm sind, gelten als zersetzt. Somit wird die Möglichkeit gegeben, Biokunststoffe herzustellen, die den Erdöl-basierten Kunststoffen chemisch-strukturell sehr ähnlich sind. Diese haben ein hohes Risiko zur Mikroplastikbildung.

3. In der Praxis werden in Deutschland und in vielen anderen Ländern biologisch abbaubare Kunststoffprodukte nicht kompostiert und auch nicht recycelt. Der aktuelle Stand der Technik bedarf etlicher Veränderungen, um eine sinnvolle Verwertung von biologisch abbaubaren Kunststoffen zu gewährleisten. Derzeit stellt die thermische Verwertung zur Erzeugung von Energie in Form von Wärme und Strom die beste Option dar. Dies widerspricht jedoch den Prinzipien nachhaltiger und umweltfreundlicher Produkte. Eine Entsorgung von biologisch abbaubaren Kunststoffen über die Biotonne sowie den Gartenkompost ist aktuell nicht erstrebenswert.

Abschließend lässt sich über Biokunststoffe sagen, dass sie aktuell für langlebige Anwendungsbereiche eine Alternative gegenüber konventionellen Kunststoffen darstellen können. Vor Einweganwendungen ist abzuraten. Oberste Priorität sollte jedoch in allen Bereichen, sei es kommerziell oder privat, die Vermeidung von Kunststoffabfällen haben.

7 Literaturverzeichnis

Bernnat, F. & Keshishian, N., 2021. *Entsorgung kompostierbarer Verpackungen in Deutschland- Betrachtung der verschiedenen Entsorgungswege*, Berlin: Initiative Kreislaufverpackung.

Bertling, J., Bertling, R. & Hamann, L., 2018. *Kunststoffe in der Umwelt: Mikro- und Makroplastik*, Oberhausen: Fraunhofer Umsicht.

BioPlasticsEurope, ohne Datum. *Projekt Informations*. [Online]
Available at: <https://bioplasticseurope.eu/project>

Boucher, J. & Friot, D., 2017. *Primary Microplastics in the Oceans, a global Evaluation of Sources*, Gland, Schweiz: IUCN.

Bundesregierung, 2021. *Nachhaltigkeitspolitik*. [Online]
Available at: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/nachhaltigkeitspolitik/einwegplastik-wird-verboden-1763390>
[Zugriff am 16. September 2021].

Burgstaller, M., Potrykus, A., Weißenbacher, J., Dr. Kabaski, S., Dr. Merreting-Bruns, U. & Sayder, B., 2018. *Gutachten zur Behandlung biologisch abbaubarer Kunststoffe*, Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

Busse, L. & Rachenberg, B., 2019. *Kunststoffe in der Umwelt*, Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

EN ISO 20200:2015 Kunststoffe – Bestimmung des Zersetzungsgrades von Kunststoffmaterialien unter nachgebildeten Kompostierungsbedingungen mittels einer Prüfung im Labormaßstab

EN 14995:20006 Kunststoffe – Bewertung der Kompostierbarkeit – Prüfschema und Spezifikationen

EN 13432:2000 Anforderungen an die Verwertung von Verpackungen durch Kompostierung und biologischen Abbau Prüfschema und Bewertungskriterien für die Einstufung von Verpackungen

EN 16575:2014 Biobasierte Produkte – Terminologie

Endres, H.-. J., Mudersbach, M. & Spierling, S., 2020. *Biokunststoffe unter dem Blickwinkel der Nachhaltigkeit und Kommunikation. Status quo, Möglichkeiten und Herausforderungen*. Wiesbaden Heidelberg: Springer Vieweg.

Endres, H.-. J. & Siebert-Raths, A., 2009. *Technische Biopolymere. Rahmenbedingungen, Marktsituation, Herstellung, Aufbau und Eigenschaften*. s.l.:Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.

Essel, R., Engel, L. & Carcus, M., 2015. *Quellen für Mikroplastik mit Relevanz für den Meeresschutz in Deutschland*, Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

European bioplastics, 2021. *bioplastic materials*. [Online]
Available at: <https://www.european-bioplastics.org/bioplastics/materials/>
[Zugriff am 20. Oktober 2021].

Fent, K., 2013. *Ökotoxikologie: Umweltchemie, Toxikologie, Ökologie*. 4 Hrsg. Stuttgart New York: Gerorg Thieme Verlag.

Fitzner, S., Heni, Y. & Tun, G., 2020. *Kunststoffabfälle in Deutschland 2019, Aufkommen, Steigerung und Trends*, Berlin: Nabu.

- Fraunhofer IWKS, 2018. *Positionspapier zu Bioplastik*, Alzenau: Fraunhofer IWKS.
- Fraunhofer UMSICHT, 2021. *Biokunststoffe*, Oberhausen: Fraunhofer UMSICHT.
- Frick, A. & Stern, C., 2006. *DSC-Prüfung in der Anwendung*. München: Hanser Verlag.
- Frick, A. & Stern, C., 2013. *DSC-Prüfung in der Anwendung*. München: Hanser Verlag.
- Hohmann, M., 2021. *Entwicklung der weltweiten Produktionskapazität von Bioplastik*. [Online]
Available at: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/981058/umfrage/entwicklung-der-weltweiten-produktionskapazitaet-von-bioplastik/>
- KBU, 2021. *Plastik und andere persistente "neue" Stoffe im Boden, weitere Herausforderungen im Bodenschutz*, Dessau-Roßlau: Position der Kommission Bodenschutz beim Umweltbundesamt (KBU).
- Liebmann, B., 2015. *Mikroplastik in der Umwelt- Vorkommen, Nachweis und Handlungsbedarf*, Wien: Umweltbundesamt.
- Lumitos, 2021. *Biokunststoff*. [Online]
Available at: <https://www.chemie.de/lexikon/Biokunststoff.html>
[Zugriff am 23. Oktober 2021].
- Meier, N., 2018. *Abbaubare Kunststoffe- Ansätze und Erfahrungswerte aus 16 Mitgliedsstaaten des EPA- Netzwerks*, Dessau-Roßlau: EPA Network.
- Menzel, R., Friedrich, B., Hermann, T., He, L., Dr. Scholz, K., Dr. Szewzyk, R., 2015. *Richtig kompostieren- Tipps und Hinweise*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- Möller, A., 2021. *Stadtreinigung Hamburg*. [Online]
Available at: <https://www.stadtreinigung.hamburg/impressum>
[Zugriff am 30. November 2021].
- PlasticsEurope, 2021. *Wie Kunststoffe hergestellt werden*. [Online]
Available at: <https://www.plasticseurope.org/de/about-plastics/what-are-plastics/how-plastics-are-made>
[Zugriff am 14. September 2021].
- Rachenberg, B. & Busse, L., 2019. *Kunststoffe in der Umwelt*, Dessau- Roßlau: Umweltbundesamt.
- Schwedt, G., Schmidt, T. C. & Schmitz, O. J., 2016. *Analytische Chemie. Grundlagen, Methoden und Praxis*. 3 Hrsg. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Schwedt, G. & Vogt, C., 2010. *Analytische Trennmethode*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Trabert, A., 2010. *Biologisch abbaubare Kunststoffe*. Marburg: Phillips-Universität Marburg.
- Türk, O., 2014. *Stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe. Grundlagen, Werkstoffe, Anwendungen*. 1 Hrsg. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- TÜV AUSTRIA BELGIUM NV/SA, 2021. *Zertifizierungen*. [Online]
Available at: <https://www.tuv-at.be/de/green-marks/zertifizierungen/ok-compost-seedling/>
[Zugriff am 17. September 2021].
- Umweltbundesamt, 2018. *Kunststoffe*, Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- Umweltbundesamt, 2020. *Kunststoffe in Böden*, Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

Weber, R., 2015. *Arbeitstechnik im Chemielabor*. Stuttgart: UTB GmbH.

Westfalia Werkzeugcompany GmbH & Co KG, 2021. *Online Shop*. [Online]

Available at: <https://www.westfalia.de/shops/garten/kompostieren/kompost/komposter/1805632-upp-trommel-komposter-2-kammern-je-70l.htm>

[Zugriff am 10. August 2021].

8 Anhang

8.1 Kompost

Tabelle 7: Zusammensetzung des künstlichen Feststoffabfalls, 18.08.2021

Material	Volumen in l	Volumenanteil in %	Masse in g Trommel 1 (grüner Deckel)	Masse in g Trommel 2 (schwarzer Deckel)
Sägespäne	15,5	26	890	898
Sägespäne versetzt mit Kaninchenmist	12	20	1307	1297
Kartoffeln	4	7	2500	2500
Bioabfall aus Haushalt -Kaffeesatz -Gemüseschalen und -reste -Eierschalen -Brotrinden -Blumenerde	4	7	1673	1497
Reifer Haushaltskompost	12	20	3990	4000
Gartenschnitt -Gras -Klee -Brennnesseln	12	20	828	808
Gesamt:	59,5	100	11188	11000
Zudem wurde jedem Behälter jeweils 5 l Wasser hinzugeführt.				

Bei diesen Werten handelt es sich um Circaangaben (Einwaage mit privater Küchenwaage).

Tabelle 8: Zusammensetzung des künstlichen Feststoffabfalls (der vorhandenen Feststoffmatrix zugeführt), 29.09.2021

Material	Volumen in l	Masse in g Behälter 1 (links/grüne Markierung)	Masse in g Behälter 2 (rechts/schwarze Markierung)
Sägespäne (Kleintierstreu) mit Kaninchenmist	12	1315	1343
Kartoffelstücke	2	1247	1317
Bioabfall aus Haushalt -Kaffeesatz	1	400	385

-Gemüseschalen und -reste -Eierschalen			
Rasenschnitt	12	1113	1117
Gesamt:	27	4075	4162

Bei diesen Werten handelt es sich um Circaangaben (Einwaage mit privater Küchenwaage).

Tabelle 9: Einwaage Kompostproben vor und nach Wärmetrocknung und der daraus errechnete Feuchtigkeitsgehalt, 13.10.2021 und 22.10.2021

Name	Gitterart	Einwaage vor Trocknung in g	Einwaage nach Trocknung in g	Feuchtigkeitsgehalt in %
t0	-	15,600	3,832	75,436
t2	grob	24,213	8,313	65,667
t2	fein	15,441	5,274	65,844
t4	grob	23,920	8,660	63,796
t4	fein	23,220	7,296	68,579
t6	grob	27,040	9,000	66,716
t6	fein	25,420	7,984	68,592
t8	grob	13,200	4,785	63,750
t8	fein	20,210	6,312	68,768

Die Einwaage der Kompostproben erfolgte mit der Laborwaage des Herstellers Sartorius mit der Kennzeichnung IA182.

Tabelle 10: Einwaage Kompostproben für ASE, 22.10.2021

Name	Gitterart	Gewicht in g	Position ASE
t0	-	3,75	2
t2_rechts	fein	4,27	3
t2_links	grob	4,10	4
t4_rechts	fein	4,20	5
t4_links	grob	4,05	6
t6_rechts	fein	4,14	7
t6_links	grob	4,11	8
t8_rechts	fein	4,23	9
t8_links	grob	4,09	10
Blank	-	0,00	1

Die Einwaage der Kompostproben für die ASE erfolgte mit der Laborwaage des Herstellers Precisa mit der Kennzeichnung BJ 1000C.

Tabelle 11: Einwaage Kompostproben für ASE (2. Durchgang erforderlich, da manche Proben vom Gerät nicht durchlaufen worden sind), 25.10.2021

Name	Gitterart	Gewicht in g	Position ASE
t2_rechts	fein	0,95	1
t2_links	grob	4,12	2
t8_rechts	grob	4,23	3
t8_links	fein	4,09	4

Die Einwaage der Kompostproben für den 2. Durchgang der ASE erfolgte ebenfalls mit der Laborwaage des Herstellers Precisa mit der Kennzeichnung BJ 1000C.

Tabelle 12: Volumenbestimmung Eluat für GC-MS Messung, 27.10.2021

Name	Gitterart	Eluat in μl	Hexan in μl
Blank	-	350	450
t0	-	376	524
t2_rechts	fein	304	596
t2_links	grob	310	490
t4_rechts	fein	350	450
t4_links	grob	316	484
t6_rechts	fein	339	461
t6_links	grob	527	273
t8_rechts	fein	240	560
t8_links	grob	225	575
t2_rechts 2.Durchgang	fein	350	450
t2_links 2.Durchgang	grob	250	550

Tabelle 13: PAK/PCB IntEx Standards für CAL, Quelle: HAW Ökotoxikologie Labor, 2021

V1:			
	c ng/ μl	Standard Vo μl	Hexan μl
PAK ex	10	50	450
PAK int	10	60	540
PCB ex	10	50	450
PCB int	5	60	540
V2:			
	c pg/ μl	Standard V1 μl	Hexan μl
PAK ex	100	50	450
PAK int	100	60	450
L4:			
		Standards μl	c pg/ μl

PAK ex		100 V0	1000
PAK int		100 V1	100
PCB ex		50 V0	500
PCB int		100 V1	50
Hexan		650	
L3:			
		Standard μl	c pg/μl
PAK ex		50 V0	500
PAK int		100 V1	100
PCB ex		25 V0	250
PCB int		100 V1	50
Hexan		725	
L2:			
		Standard μl	c pg/μl
PAK ex		100 V1	100
PAK int		100 V1	100
PCB ex		50 V1	50
PCB int		100 V1	50
Hexan		650	
L1:			
		Standard μl	c pg/μl
PAK ex		100 V2	10
PAK int		100 V1	100
PCB ex		50 V2	5
PCB int		100 V1	50
Hexan		650	

8.2 Prüfmaterial

Tabelle 14: Einwaage Prüfmaterial bei Versuchsbeginn und -ende zur Bestimmung des Zersetzungsgrades, 18.08.2021 und 13.10.2021

Name	Gitterart	Einwaage bei Versuchsbeginn in mg	Einwaage bei Versuchsende in mg
BPE-AMF-PLA	grob	900,63	902,60
BPE-AMF-PLA	fein	1112,61	1121,26
PBE-RP-PLA	grob	958,41	954,48
PBE-RP-PLA	fein	1120,99	1117,20
BPE-SP-PBS	grob	1289,59	1278,19
BPE-SP-PBS	fein	1032,00	1021,87
BPE-T-PHBV	grob	1331,82	1215,37
BPE-T-PHBV	fein	1187,24	1171,05

Tabelle 15: Einwaage Prüfmaterial für DSC-Messung, 18.10.2021

Name	Gitterart	Gewicht in mg	Position in DSC
BPE-SP-PBS	fein	5,91	1
BPE-SP-PBS	grob	6,2	2
PBE-RP-PLA	fein	5,95	3
PBE-RP-PLA	grob	6,18	4
BPE-T-PHBV	fein	6,15	6
BPE-T-PHBV	grob	6,2	7
BPE-AMF-PLA	fein	5,9	8
BPE-AMF-PLA	grob	6,09	9

Tabelle 16: Einwaage Rohmaterial für DSC-Messung, 18.10.2021

Name	Gewicht in mg	Position in DSC
BPE-SP-PBS_Ref	6,15	9
BPE-RP-PLA_Ref	6,16	10
BPE-T_PHBV_Ref	5,96	11
BPE-AMF-PLA_Ref	6,11	12

Die Einwaagen des Prüfmaterials erfolgten mit der Laborwaage des Herstellers Mettler Toledo mit der Kennzeichnung 240A995 D-K-19398-02-00 2018-12.

8.3 Bildliche Dokumentation des Prüfmaterials



Abbildung 33: BPE-AMF-PLA, Maschenart: grob, Zeit: t1



Abbildung 34: BPE-AMF-PLA mit Ummantelung, Maschenart: grob, Zeit: t5



Abbildung 35: BPE-AMF-PLA, Maschenart: grob, Zeit: t5



Abbildung 36: BPE-AMF-PLA gereinigt, Maschenart: grob, Zeit: t8



Abbildung 37: BPE-AMF-PLA, Maschenart: fein, Zeit: t1



Abbildung 38: BPE-AMF-PLA, Maschenart: fein, Zeit: t5



Abbildung 39: BPE-AMF-PLA gereinigt, Maschenart: fein, Zeit: t8



Abbildung 40: BPE-RP-PLA, Maschenart: grob, Zeit: t1



Abbildung 41: BPE-RP-PLA, Maschenart: fein, Zeit: t1



Abbildung 42: BPE-RP-PLA, Maschenart: grob, Zeit: t5



Abbildung 43: BPE-RP-PLA, Maschenart: fein, Zeit: t5



Abbildung 44: BPE-RP-PLA gereinigt, Maschenart: grob, Zeit: t8

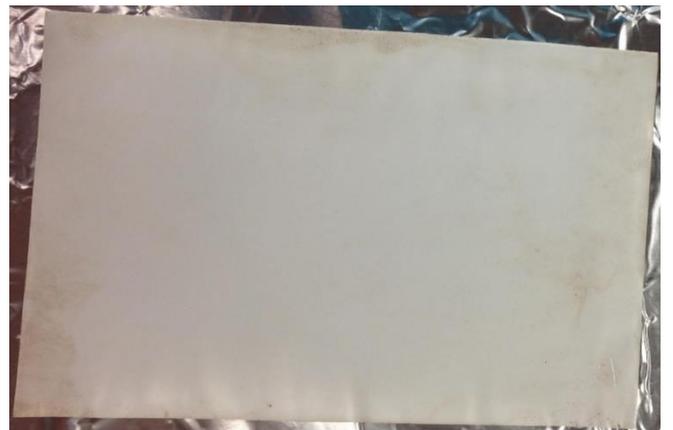


Abbildung 45: BPE-RP-PLA gereinigt, Maschenart: fein, Zeit: t8



Abbildung 46: BPE-SP-PBS, Maschenart: grob, Zeit: t1



Abbildung 47: BPE-SP-PBS, Maschenart: fein, Zeit: t1



Abbildung 48: BPE-SP-PBS, Maschenart: grob, Zeit: t5



Abbildung 49: BPE-SP-PBS, Maschenart: fein, Zeit: t5



Abbildung 50: BPE-SP-PBS gereinigt, Maschenart: grob, Zeit: t8



Abbildung 51: BPE-SP-PBS gereinigt, Maschenart: fein, Zeit: t8



Abbildung 52: BPE-T-PHBV, Maschenart: grob, Zeit: t1



Abbildung 53: BPE-PHBV, Maschenweite: fein, Zeit: t1



Abbildung 54: BPE-T-PHBV, Maschenart: grob, Zeit: t5



Abbildung 55: BPE-T-PHBV, Maschenart: fein, Zeit: t5



Abbildung 56: BPE-T-PHBV gereinigt, Maschenart: grob, Zeit: t8



Abbildung 57: BPE-T-PHBV gereinigt, Maschenart: fein, Zeit: t8

8.4 Auswertung GC-MS Messung

Tabelle 17: GC-MS Auswertung Kompostproben, Schadstoffgehalt in µg/kg Trockengewicht

Probennamen	Naph	Acy	Ace	Fl	Anth	Phen	PCB 28
Blank_MM	>	>	>	>	<	>	<
to_MM	>	>	>	>	>	>	1,6
t2_rechts_MM	>	>	>	>	>	>	0,8
t2_rechts_2.Durchgang_MM	>	>	>	>	>	>	4,5
t2_links_MM	>	>	>	>	>	>	0,9
t2_links_2.Durchgang_MM	>	>	>	>	>	>	2,7
t4_rechts_MM	>	>	>	>	>	>	2,3
t4_links_MM	>	>	>	>	>	>	0,8
t6_rechts_MM	>	>	>	>	>	>	0,8
t6_links_MM	>	>	>	>	>	>	0,8
t8_rechts_MM	>	>	>	>	>	>	1,5
t8_links_MM	>	>	>	>	>	>	1,0

Tabelle 18: Weitere GC-MS Auswertung Kompostproben, Schadstoffgehalt in µg/kg Trockengewicht

Probennamen	PCB 52	Fluo	Pyr	PCB 101	PCB 118	PCB 153	PCB 138
Blank_MM	<	<	>	<	<	<	<
to_MM	<	>	>	179,5	<	22,1	26,7
t2_rechts_MM	<	>	>	<	<	3,8	5,0
t2_rechts_2.Durchgang_MM	<	>	>	1550,0	<	53,6	66,5
t2_links_MM	<	>	>	533,9	<	12,6	15,9
t2_links_2.Durchgang_MM	<	>	>	<	<	2,1	<
t4_rechts_MM	<	>	>	290,4	<	15,4	19,1
t4_links_MM	<	>	>	219,1	<	7,6	9,8
t6_rechts_MM	<	>	>	2045,2	<	8,3	11,1
t6_links_MM	<	>	>	2060,1	<	8,3	11,2
t8_rechts_MM	<	>	>	926,8	<	13,7	>
t8_links_MM	<	>	>	196,9	<	14,1	18,0

Tabelle 19: Weitere GC-MS Auswertung Kompostproben, Schadstoffgehalt in µg/kg Trockengewicht

Probennamen	BaA	Chr	PCB 180	BbF	BkF	BaP	InP	BghIP	DBA
Blank_MM	<	>	<	<	<	<	<	<	<
to_MM	>	>	>	>	>	>	>	>	>
t2_rechts_MM	>	>	<	>	>	>	>	>	>
t2_rechts_2.Durchgang_MM	>	>	>	>	>	>	>	>	>
t2_links_MM	>	>	>	>	>	>	>	>	>
t2_links_2.Durchgang_MM	>	>	<	>	>	>	>	>	>
t4_rechts_MM	>	>	>	>	>	>	>	>	>
t4_links_MM	>	>	>	>	>	>	>	>	>

t6_rechts_MM	>	>	>	>	>	>	>	>	>
t6_links_MM	>	>	>	>	>	>	>	>	>
t8_rechts_MM	>	>	>	>	>	>	>	>	>
t8_links_MM	>	>	>	>	>	>	>	>	>

Tabelle 20: GC-MS Auswertung Wiederfindungsrate

Probenname	Naph	Acy	Ace	Fl	Anth	Phen	PCB 28	PCB 52	Fluo
Blank_MM	10%	13%	12%	8%	6%	6%	17%	22%	6%
to_MM	45%	79%	75%	78%	102%	110%	247%	303%	128%
t2_rechts_MM	21%	55%	51%	58%	78%	85%	192%	246%	103%
t2_rechts_2.Durchgang_MM	93%	131%	111%	105%	124%	158%	257%	315%	160%
t2_links_MM	40%	94%	82%	89%	113%	136%	247%	309%	145%
t2_links_2.Durchgang_MM	84%	121%	98%	93%	111%	143%	223%	278%	131%
t4_rechts_MM	52%	111%	96%	99%	119%	132%	253%	312%	151%
t4_links_MM	44%	114%	100%	108%	137%	146%	314%	386%	176%
t6_rechts_MM	79%	130%	113%	113%	138%	136%	286%	356%	180%
t6_links_MM	79%	130%	113%	113%	138%	136%	286%	356%	180%
t8_rechts_MM	72%	121%	106%	108%	133%	247%	286%	360%	168%
t8_links_MM	48%	97%	88%	91%	110%	101%	237%	295%	141%

Tabelle 21: GC-MS Auswertung Wiederfindungsrate

Probenname	Pyr	PCB 101	PCB 118	PCB 153	PCB 138	BaA	Chr	PCB 180
Blank_MM	22%	4%	15%	18%	18%	3%	6%	15%
to_MM	525%	58%	229%	274%	274%	121%	155%	262%
t2_rechts_MM	414%	47%	187%	226%	227%	88%	121%	213%
t2_rechts_2.Durchgang_MM	627%	61%	239%	277%	289%	158%	184%	275%
t2_links_MM	583%	61%	240%	274%	285%	149%	172%	275%
t2_links_2.Durchgang_MM	519%	51%	203%	242%	254%	134%	144%	239%
t4_rechts_MM	596%	60%	238%	271%	284%	150%	166%	277%
t4_links_MM	696%	75%	297%	339%	355%	746%	197%	345%
t6_rechts_MM	686%	69%	273%	307%	322%	172%	201%	315%
t6_links_MM	686%	69%	273%	307%	322%	172%	201%	315%
t8_rechts_MM	668%	72%	283%	316%	331%	162%	190%	323%
t8_links_MM	558%	57%	226%	259%	270%	137%	152%	263%

Tabelle 22: GC-MS Auswertung Wiederfindungsrate

Probenname	<i>BbF</i>	<i>BkF</i>	<i>BaP</i>	<i>InP</i>	<i>BghIP</i>	<i>DBA</i>
Blank_MM	2%	3%	4%	3%	14%	5%
t0_MM	119%	180%	212%	149%	1481%	164%
t2_rechts_MM	97%	144%	153%	131%	1512%	133%
t2_rechts_2.Durchgang_MM	141%	206%	263%	196%	2193%	209%
t2_links_MM	134%	193%	212%	189%	2032%	216%
t2_links_2.Durchgang_MM	121%	164%	208%	165%	1861%	178%
t4_rechts_MM	138%	195%	177%	196%	2173%	212%
t4_links_MM	161%	232%	199%	232%	2492%	230%
t6_rechts_MM	158%	225%	164%	225%	2371%	584%
t6_links_MM	158%	225%	164%	225%	2371%	584%
t8_rechts_MM	145%	208%	208%	202%	2190%	256%
t8_links_MM	128%	171%	127%	187%	2026%	187%

8.5 GC-MS-Daten Kompostextrakte

Tabelle 23: GC-MS Daten Kompostextrakte

Sample										Naph Results					Naph D (STD) Results	
	Name	Data File	Type	Level	Dil.	Acq. Date-Time	Acq. Method File	DA Method File	RT	Final Conc.	Accuracy	S/N	Resp.	Resp.	S/N	
	PAHPCB_intex_L1_10_211027_1	PAHPCB_intex	Sample		1	27-Okt-21 11:50	E_PAH_PCB_Int	Quant_E_PAH_PCB_Int_Ext	7,066433333	60,7141245		171,0498835	19848,7257	105935,8413	1109,827249	
	PAHPCB_intex_L2_100_211027_1	PAHPCB_intex	Sample		1	27-Okt-21 12:41	E_PAH_PCB_Int	Quant_E_PAH_PCB_Int_Ext	7,0664	78,5717509		1526,90255	183771,4587	105763,0599	1315,273293	
	PAHPCB_intex_L3_500_211027_1	PAHPCB_intex	Sample		1	27-Okt-21 13:33	E_PAH_PCB_Int	Quant_E_PAH_PCB_Int_Ext	7,066383333	160,714125		4860,90179	942150,8588	106237,8709	1896,618311	
	PAHPCB_intex_L4_1000_211027_1	PAHPCB_intex	Sample		1	27-Okt-21 14:24	E_PAH_PCB_Int	Quant_E_PAH_PCB_Int_Ext	7,062566667	266,383193		8916,372053	1915264,573	106159,4647	789,5368642	
	Blank_MM	Blank_MM.D	Sample		1	27-Okt-21 16:07	E_PAH_PCB_Int	Quant_E_PAH_PCB_Int_Ext	7,06655	363,481463		894,6989421	267095,519	10090,3302	91,62937582	
	to_MM	to_MM.D	Sample		1	27-Okt-21 16:58	E_PAH_PCB_Int	Quant_E_PAH_PCB_Int_Ext	7,066483333	133,196834		1816,826742	251017,4204	38739,93089	292,8534218	
	t2_rechts_MM	t2_rechts_MM.D	Sample		1	27-Okt-21 17:50	E_PAH_PCB_Int	Quant_E_PAH_PCB_Int_Ext	7,06655	109,49787		627,7855752	79231,20796	17916,46133	124,7883864	
	t2_rechts_2 Durchgang_MM	t2_rechts_2.D	Sample		1	27-Okt-21 18:41	E_PAH_PCB_Int	Quant_E_PAH_PCB_Int_Ext	7,066133333	99,5843667		2495,351411	320558,0328	90002,13457	691,9935793	
	t2_links_MM	t2_links_MM.D	Sample		1	27-Okt-21 19:33	E_PAH_PCB_Int	Quant_E_PAH_PCB_Int_Ext	7,066416667	97,8322458		247,9321034	132566,3358	38880,65285	288,887547	
	t2_links_2 Durchgang_MM	t2_links_2.D	Sample		1	27-Okt-21 20:24	E_PAH_PCB_Int	Quant_E_PAH_PCB_Int_Ext	7,066383333	79,6748341		818,1406861	149688,5741	81648,23577	626,6308245	
	t4_rechts_MM	t4_rechts_MM.D	Sample		1	27-Okt-21 21:15	E_PAH_PCB_Int	Quant_E_PAH_PCB_Int_Ext	7,0666	139,472062		1547,634796	351526,6492	50044,35344	401,9743941	
	t4_links_MM	t4_links_MM.D	Sample		1	27-Okt-21 22:07	E_PAH_PCB_Int	Quant_E_PAH_PCB_Int_Ext	7,066333333	147,992271		975,3565717	334250,6936	43051,70108	264,0861414	
	t6_rechts_MM	t6_rechts_MM.D	Sample		1	27-Okt-21 22:58	E_PAH_PCB_Int	Quant_E_PAH_PCB_Int_Ext	7,066383333	157,86353		1484,568533	661978,7081	76788,04953	391,297215	
	t6_links_MM	t6_links_MM.D	Sample		1	27-Okt-21 23:49	E_PAH_PCB_Int	Quant_E_PAH_PCB_Int_Ext	7,066316667	135,904005		824,4201516	465624,5532	69345,49732	631,2388879	
	t8_rechts_MM	t8_rechts_MM.D	Sample		1	28-Okt-21 00:41	E_PAH_PCB_Int	Quant_E_PAH_PCB_Int_Ext	7,0665	100,39531		542,3071033	169976,5321	46798,81697	270,9685599	
	t8_links_MM	t8_links_MM.D	Sample		1	28-Okt-21 01:32	E_PAH_PCB_Int	Quant_E_PAH_PCB_Int_Ext	7,066416667	111,669668		380,213534	201386,5266	43677,22513	248,8164483	
	PAHPCB_intex_L1_1000_211027_2	PAHPCB_intex	Sample		1	28-Okt-21 03:15	E_PAH_PCB_Int	Quant_E_PAH_PCB_Int_Ext	7,070216667	60,752279		96,9789068	19187,22288	100626,4607	739,8464246	
	PAHPCB_intex_L2_1000_211027_2	PAHPCB_intex	Sample		1	28-Okt-21 04:07	E_PAH_PCB_Int	Quant_E_PAH_PCB_Int_Ext	7,06655	78,3982819		737,572848	183388,0621	106465,0924	696,0808612	
	PAHPCB_intex_L3_1000_211027_2	PAHPCB_intex	Sample		1	28-Okt-21 04:58	E_PAH_PCB_Int	Quant_E_PAH_PCB_Int_Ext	7,062733333	161,203916		4063,126404	953895,9541	107049,0196	946,9675974	
	PAHPCB_intex_L4_1000_211027_2	PAHPCB_intex	Sample		1	28-Okt-21 05:49	E_PAH_PCB_Int	Quant_E_PAH_PCB_Int_Ext	7,062716667	264,489935		4735,206679	1959327,915	109600,2436	1085,698461	

Acy Results					Acy D (STD) Results		Ace Results					Ace D (STD) Results		Fluoren Results					Fluoren D (STD) Results	
RT	Final Conc.	Accuracy	S/N	Resp.	Resp.	S/N	RT	Final Conc.	Accuracy	S/N	Resp.	Resp.	S/N	RT	Final Conc.	Accuracy	S/N	Resp.	Resp.	S/N
10,09273333	61,1643944		128	11227,41391	73591,38649	1261,5153	10,46165	60,88089867		88,35223491	7794,013196	44178,67735	463,141093	11,45453333	61,0245732		131,468734	11834,91961	58726,38919	73,50192786
10,0927	77,6712111		###	149081,7616	90788,17551	764,6173994	10,4616	78,23820265		904,5883104	105082,4472	61280,79854	698,061958	11,45243333	77,9508536		344,683946	115710,4486	57863,64061	320,2794873
10,09268333	161,164394		###	832689,334	90744,21001	1190,410886	10,45583333	160,8808987		3437,47068	565806,3506	62594,35136	687,503811	11,45243333	161,0245732		7802,79412	653074,1008	60329,38918	744,7989667
10,0868	271,378317		###	1748883,878	91461,37622	1184,406647	10,45571667	265,0903653		6835,670912	1166051,963	63805,26165	730,708939	11,45231667	267,1785982		10371,2009	1352530,179	61193,44416	167,4705818
10,09283333	59,8893991		0,5	346,1115	9226,447317	108,8044274	10,46175	63,64931097		2,364634557	2816,541	6677,747875	12,0199511	11,46001667	99,29281479		22,4305682	20630,39904	4834,875854	20,12019624
10,09278333	59,9164581		3,1	2027,633388	50748,31852	247,0322828	10,45593333	60,23944213		4,42477773	4420,068113	36966,67002	143,046912	11,45623333	64,3189295		42,8020694	23041,73227	41779,64908	115,5311699
10,09283333	60,2438224		6,7	2467,629314	35508,04432	231,0586449	10,46175	60,19253519		5,436815341	2888,770018	25030,12612	190,016002	11,4563	62,28562994		16,1004434	10297,38291	30692,99152	90,5752408
10,09243333	60,5678851		17	9394,889803	95150,40358	524,0955393	10,46133333	60,81840974		7,291498986	10513,3755	61524,19922	206,873607	11,45588333	64,16334857		121,645745	33647,17915	62894,5328	421,6228833
10,09271667	61,5421168		4,3	12737,34136	68242,35311	614,3648249	10,46163333	60,32714842		6,340899888	5751,385704	45164,77961	200,910681	11,45616667	63,0114173		64,8121256	21920,27056	53127,03203	96,38399649
10,09266667	59,6857128		3,3	1681,2215	87870,18139	1040,870128	10,46158333	59,53597055		1,111789341	3107,211863	54301,49358	361,55022	11,45613333	60,99505253		33,3116712	11011,73528	55505,42032	70,80226106
10,09288333	61,4805073		16	14609,7225	80676,94285	769,0800202	10,4618	60,78133		1,890404902	8863,8795	52888,48499	304,756796	11,45635	64,98925079		45,8579131	36768,77726	59045,58665	236,9704825
10,09263333	60,7607967		12	9553,688	82256,5981	320,0541747	10,46155	60,80742757		6,46150608	9373,44	55167,535	293,243198	11,45443333	64,64187881		65,8407818	37854,5353	64618,58206	171,2245383
10,09266667	77,7473626		13	155351,324	94211,97888	99,03540483	10,45581667	74,92848275		8,832390715	89017,9205	62625,41079	297,561273	11,45241667	113,8960503		643,946806	394309,8007	67769,59543	548,3003545
10,09261667	62,1586201		19	21251,351	87714,08629	550,3146612	10,46153333	64,00585093		4,723997309	26473,49125	58391,44451	410,409681	11,45441667	69,31882549		211,442698	70176,67	64817,80811	113,7327259
10,09278333	61,1647077		13	10665,98	69898,45077	464,0347815	10,4617	60,43234401		6,623453095	6679,6845	48876,12673	312,214887	11,45458333	63,22096372		62,7095535	23737,49005	54586,1996	344,9763559
10,0927	60,7081892		12	7513,202	67444,78042	235,0475517	10,45585	61,08850401		2,043635718	8589,415455	44088,98945	234,335056	11,45451667	64,77762728		86,7441353	29336,83145	48875,46185	470,4799209
10,0928	61,2089524		131	15312,28911	97788,99131	871,0015726	10,45595	60,76714691		91,52819111	9816,788602	59016,89496	654,899632	11,45625	60,97359419		136,421687	10992,03561	56050,18099	89,09340645
10,08706667	77,5677335		###	168693,8129	103319,0793	927,6308687	10,45598333	78,23943253		825,9912535	108844,2827	63470,54881	545,877357	11,45463333	77,88884934		830,099121	119532,5488	59972,51973	706,272177
10,08696667	155,152489		###	922779,7195	106880,7524	1131,755174	10,45588333	158,9673474		5918,801449	587568,074	66244,70586	497,731706	11,45248333	157,7072694		4792,77092	676148,2146	64562,79155	187,414456
10,08695	256,559739		###	1932846,813	108682,2822	839,544257	10,45586667	259,7469776		6944,327071	1210594,751	68004,85235	751,131572	11,45081667	258,7572069		7504,34054	1412221,418	66589,4733	1109,012012

Phen Results					Phen D (STD) Results		Anth Results					Anth D (STD) Results		PCB 28 Results					PCB 28i (STD) Results	
RT	Final Conc.	Accuracy	S/N	Resp.	Resp.	S/N	RT	Final Conc.	Accuracy	S/N	Resp.	Resp.	S/N	RT	Final Conc.	Accuracy	S/N	Resp.	Resp.	S/N
13,72736667	61,1395637		90,17213754	18408,08373	81341,309	200,2995321	13,87041667	61,59491933		76,89134535	10528,3795	70221,02	164,3468402	15,1709	1,81507707		56,18278361	3807,810959	25622,89927	233,9067946
13,72528333	77,7208726		196,0343157	148478,4059	78563,19327	227,9292445	13,86833333	76,81016135		152,6615344	123943,7059	73405,64842	199,4299432	15,16881667	18,79137113		258,9783709	39449,3067	25640,63996	123,0408065
13,72526667	161,139564		2362,466145	886630,6093	86421,37599	480,9399938	13,86181667	161,5949193		264,2874202	821302,8374	80035,009	270,2897089	15,1688	103,53406		1689,131019	235764,4294	27812,69013	173,6924882
13,72515	269,58191		32487,55287	1847548,319	87397,91493	214,6784112	13,8617	268,1086704		53603,46693	1801229,24	85641,019	198,4905214	15,16883333	201,428483		5977,824836	480270,538	29121,45196	342,9731136
13,73193333	84,532582		33,1001744	12459,8927	4841,900104	35,64613722	13,88148333	63,67710366		4,107501614	1366,981302	3792,117881	27,2873374	15,16895	0,39921013		0,986050756	128,8516389	3942,179174	30,60677185
13,72536667	82,0207244		662,816719	159647,889	68774,28964	147,7731268	13,86841667	62,97303592		77,89369289	17973,97188	62132,34164	123,6628147	15,1689	0,15725624		0,875455931	640,582	49752,48935	343,1840219
13,72543333	77,4695492		126,6421329	98476,15906	52810,50495	124,911982	13,86848333	61,65088112		8,545820715	7449,858948	47881,1015	103,3984482	15,14295	0,0927125		1,820364006	293,64115	38683,5753	236,4845156
13,71851667	108,457485		1284,952971	469480,4122	94391,5775	443,2469004	13,86806667	65,33805119		119,4326934	52885,407	100079,8005	308,2679756	15,16203333	0,11497033		1,697818103	547,862	58201,38943	310,361324
13,7253	110,950443		565,1494502	446917,0458	85552,80348	126,4661871	13,86835	68,01066078		77,70519001	68697,14936	86013,03652	118,6408626	15,16233333	0,10218365		1,791422703	468,9327091	56050,19021	309,5490637
13,72525	69,9130585		251,8357531	93270,25079	84288,56642	138,5686888	13,86831667	60,73680215		11,44919075	5745,336	90964,22517	111,9097187	15,11676667	0,30291144		1,35329992	1252,128848	50487,20193	213,5513627
13,72546667	106,829498		913,9650302	436819,0872	90806,92689	279,6787572	13,86851667	64,61577346		64,80313104	38183,29417	83846,235	245,2702308	15,1755	0,26492398		6,40644783	1244,169204	57359,60245	330,32094
13,72076667	91,5693604		327,62193	340403,1661	103801,91	246,2008619	13,87031667	63,77328351		28,61497919	34329,99361	92732,33301	204,2979207	15,1643	0,09055064		1,768756919	527,4222143	71140,16633	372,8668806
13,72525	971,791191		25371,62665	9629226,613	105130,8892	614,7536145	13,8618	100,1419426		32,44948617	349138,3004	86254,8195	230,1599875	15,16228333	0,09205624		1,201198901	487,4873257	64678,21649	1405,822892
13,72075	213,967657		2869,748203	1568210,375	100786,822	231,6820816	13,8638	78,41209097		285,5817053	156543,0811	84596,78558	499,5588432	15,16428333	0,16655454		2,657382903	883,5505833	64792,22559	254,4315267
13,72091667	86,2601614		401,0587809	230700,9896	83992,75609	187,1754241	13,87048333	63,77351601		34,27848548	23750,66588	64151,33147	119,6694888	15,15795	0,11062402		2,13969752	485,3341786	53584,52462	307,2313011
13,72083333	106,384086		1161,701972	375896,1665	78874,87921	191,3509628	13,8639	63,68131998		22,88832721	27683,55438	76705,72117	167,1496102	15,16436667	0,0292281		0,442593931	135,026	56424,11019	293,4483003
13,72538333	60,7196145		47,87489651	14346,13167	77894,93131	238,445088	13,86843333	61,75119065		37,59453159	13290,53344	80191,9725	231,3042804	15,16891667	1,79069706		43,24342875	3680,640286	25104,36357	230,8480387
13,72746667	76,353061		822,1649284	148441,1278	84693,3365	514,7374591	13,86401667	75,31124319		724,1562149	144913,7643	94289,16825	662,4982504	15,171	18,8757089		333,6381328	40401,66234	26142,30785	226,0684183
13,71881667	155,770248		2685,599204	894542,7065	92024,68369	347,5460902	13,86186667	144,2092791		2357,154496	912175,4457	107267,022	1124,933766	15,16885	101,49486		1984,025004	244666,8077	29442,79038	282,1067536
13,72085	256,18015		3646,140258	1902948,072	96133,2918	659,9116556	13,8574	235,079792		3561,068777	2004412,597	113291,7553	268,6350063	15,16438333	200,257975		5604,679055	503652,3068	30717,71931	266,0577322

PCB52 Results					PCB52i (STD) Results		Fluo Results					FluoD (STD) Results		Pyr Results					Pyr D (STD) Results		
RT	Final Conc.	Accuracy	S/N	Resp.	Resp.	S/N	RT	Final Conc.	Accuracy	S/N	Resp.	Resp.	S/N	RT	Final Conc.	Accuracy	S/N	Resp.	Resp.	S/N	
16,35433333	1,85038585		58,90416486	2177,8593	17312,90826	219,5766541	18,42593333	61,4787606			73,9742036	9887,964161	54602,64321	1291,1617	19,33708333	61,26249187		119,4239112	9275,973269	48910,37916	619,5699974
16,35225	19,0639457		158,0246987	21904,112	16901,11565	127,1905239	18,41671667	77,0424789			785,9884534	138740,8627	72003,3918	482,6969286	19,335	77,47501626		581,3870476	145108,3789	71967,78966	500,8083671
16,35223333	103,340574		3567,320347	130161,42	18527,37607	295,1822343	18,4167	161,478761			2721,991895	879079,0536	77125,38869	704,4528892	19,33498333	161,2624919		2388,572337	923400,9813	80600,47424	540,4553574
16,35211667	199,686988		5301,665399	266520,19	19632,82802	321,4964307	18,4166	271,730246			10758,649	1910491,212	80391,2461	560,3150897	19,32775	274,0615768		6062,680709	2025998,742	83838,67077	816,8738372
16,3524	0,51092564		3,112439308	96,807662	2787,112805	42,35549912	18,4311	73,4634435			44,01614385	5833,24021	3824,055817	46,97384337	19,33515	67,86704523		27,71172911	3597,02866	3852,120884	45,91003457
16,34583333	0,2200325		9,530559908	504,92723	33755,49409	551,5333475	18,4168	124,888566			378,1049864	561759,7953	77019,41711	246,8125505	19,32796667	111,5917881		367,5403495	471792,32	80508,05433	472,0926343
16,34588333	0,07344875		2,659936746	136,78574	27394,21899	463,0893649	18,41686667	117,873256			199,8921519	401649,8207	61727,34346	710,795675	19,32803333	108,0192019		798,3986466	346408,3848	63471,8538	362,688982
16,35198333	0,45792515		10,19791128	1229,4899	39494,17034	440,1128193	18,41645	179,876494			1475,048277	1454500,254	108047,1593	567,0553655	19,32761667	158,9935958		3099,908493	1211028,52	108118,9845	272,7980437
16,35226667	0,1072631		2,444641998	282,07421	38682,59135	417,2195309	18,41673333	255,514162			1759,234074	2149592,369	97949,32431	250,2774264	19,3279	219,0538831		3658,582814	1807953,792	100621,8775	343,5587455
16,37173333	0,44007392		2,85077385	1043,0686	34865,00638	Infinity	18,4167	70,1924096			201,9178874	102717,478	88664,50247	431,9847152	19,32786667	68,30029676		167,3230834	87955,71457	89513,91571	301,0412045
16,35243333	0,37135109		9,832751308	988,42894	39152,83981	560,8297186	18,4098	162,007435			1823,733862	1169687,338	102090,5525	529,2564506	19,32806667	145,7017745		3975,432089	997579,943	102808,1586	330,8137322
16,34773333	0,08514848		3,913255984	279,97343	48366,25095	643,5138581	18,4116	144,017721			3189,706828	1121035,815	118760,6843	566,6602238	19,32986667	126,6058733		11962,86505	906805,5423	120077,9872	527,9860241
16,35221667	0,08936882		2,993682231	271,386	44668,76654	600,4633264	18,4167	838,346619			23417,32431	10612107,13	121528,3754	282,4597322	19,32785	656,246343		18714,30822	7952985,852	118302,7643	266,8306117
16,35421667	0,14856889		3,972847881	455,25774	45074,60919	963,6913169	18,41158333	402,004045			9872,304011	4355333,717	113486,1215	359,4309058	19,32985	353,6955713		27709,84493	3815304,697	115134,8623	644,4835174
16,3544	0,12938457		1,97070784	325,3664	36990,71477	574,8317296	18,41175	131,385867			1385,989201	763120,9995	95122,09317	385,2806871	19,33003333	117,3626386		2804,004673	626447,1655	96222,79797	358,9959897
16,35431667	0,09971375		2,663366326	263,41057	38858,01827	487,0557174	18,41166667	154,168759			3674,76868	978269,3593	92480,71648	437,3463704	19,32995	134,7113521		680,0259954	767253,864	90637,96419	504,2450754
16,35235	1,76886995		41,60564564	2156,9287	17936,69377	332,4589993	18,41683333	61,4441993			109,9445315	14430,44831	81430,07797	956,1727643	19,3351	61,20493942		81,28705493	15116,11609	82525,92426	780,5745485
16,34793333	18,8012753		415,2588438	23276,89	18211,26716	289,2673485	18,41891667	76,5144697			1147,599543	158107,4731	84656,332	699,440054	19,33006667	76,72313552		932,7983228	168137,7828	87046,63661	758,742709
16,34578333	101,388415		1600,566838	137554,4	19956,69774	302,9655274	18,41676667	151,83063			4204,911081	948156,0882	91912,78931	696,5020346	19,32791667	152,8005921		3747,318554	1016100,407	96742,63463	854,3888046
16,34781667	198,520297		2986,613684	279564,22	20714,72564	25,38325602	18,41168333	250,194958			6988,014245	2034956,314	95317,18774	940,2913898	19,32283333	250,4937309		2033,664173	2132687,264	99148,24274	1109,83074

PCB101 Results					PCB101i (ISTD) Results		PCB 118 Results					PCB101i (ISTD) Results		PCB153 Results					PCB153i (ISTD) Results	
RT	Final Conc.	Accuracy	S/N	Resp.	Resp.	S/N	RT	Final Conc.	Accuracy	S/N	Resp.	Resp.	S/N	RT	Final Conc.	Accuracy	S/N	Resp.	Resp.	S/N
19,47233333	1,85500418		42,18214452	1952,292242	11537,23762	460,1271139	21,72788333	2,57015329		46,1691094	3090,28567	11537,23762	460,1271139	22,54495	1,75004277		81,90203509	2362,95917	14122,61643	387,8537184
19,46313333	19,1517485		345,1738623	30168,54982	17268,23319	280,9442286	21,72208333	18,8564488		375,526914	33934,82207	17268,23319	280,9442286	22,53916667	19,2208388		512,1660866	25970,4066	14132,33815	404,2186381
19,47023333	103,2805		1428,598068	190860,3299	20258,12475	767,3030295	21,72206667	103,238983		2078,31227	217961,9698	20258,12475	767,3030295	22,53915	103,269427		5226,488543	144914,612	14677,36256	378,0760671
19,463	204,355624		3922,972193	396125,0715	21249,44723	612,2069826	21,72736667	209,930094		3540,65695	464900,5953	21249,44723	612,2069826	22,53903333	202,654587		10059,25956	354350,782	18288,77278	776,2307866
19,45615	0,18434563		0,879013755	46,43262222	2761,164329	90,1486922	21,71681667	0,10426775		0,67929815	30,00405982	2761,164329	90,1486922	22,5339	0,06870433		0,527629129	16,4008791	2496,839539	83,27989428
19,46321667	0,84628955		18,79792767	2850,230048	36920,09733	535,2410871	21,71676667	0,18733524		1,76796877	720,8088034	36920,09733	535,2410871	22,53925	1,81145387		6,927849303	5973,43389	34490,88912	913,7465001
19,4704	0,12453516		2,596962339	341,7514386	30082,93961	468,4439801	21,72223333	0,04667827		1,70065459	146,343293	30082,93961	468,4439801	22,5339	0,35016046		6,108925794	953,033734	28467,4635	847,4536134
19,46998333	0,48956973		14,48344045	1934,633999	43319,7718	745,1806649	21,72181667	0,15718586		2,54992497	709,6388921	43319,7718	745,1806649	22,5389	1,1117702		5,538709885	4164,00488	39174,53125	884,8105082
19,46315	0,41679509		8,215409303	1654,1675	43506,96505	1019,634915	21,7221	0,13805494		5,32746715	625,9627636	43506,96505	1019,634915	22,53918333	1,12659886		5,256116996	4186,4158	38866,96803	979,282085
19,47023333	0,13802172		5,08852875	462,8987878	36765,50279	897,771	21,74371667	0,04255063		0,76021268	163,0362795	36765,50279	897,771	22,53913333	0,19177097		6,493620704	627,486343	34223,86291	841,7036112
19,46331667	0,53378882		4,267081394	2098,084533	43087,90852	914,2064248	21,72768333	0,16244868		2,64241901	729,4732347	43087,90852	914,2064248	22,53935	1,40728114		5,82716314	5166,07106	38396,10006	767,5813229
19,46511667	0,23751849		9,05299663	1166,150667	53821,915	1848,706494	21,72236667	0,09549972		4,20481786	535,6720731	53821,915	1848,706494	22,53945	0,67254384		5,910499281	3084,93836	47977,04548	1018,370542
19,4631	0,25069343		11,3859666	1131,446333	49475,8098	700,8234337	21,72206667	0,10821631		5,84291123	557,9860972	49475,8098	700,8234337	22,53913333	0,74797761		5,729095432	3113,65465	43540,10276	1025,458991
19,4651	0,42862414		18,94104096	2004,43479	51264,55681	807,268036	21,71695	0,14092013		2,61940817	752,8838864	51264,55681	807,268036	22,53943333	1,26719464		5,787943618	5422,9684	44761,16205	707,6437005
19,46528333	0,52249042		19,66463464	1952,56555	40966,53105	668,5161895	21,72253333	0,15125878		3,03815133	645,7844126	40966,53105	668,5161895	22,5396	1,2623758		5,263603136	4424,8548	36662,15363	724,205957
19,47231667	0,30680881		9,98905159	1227,299554	43851,51997	309,5402231	21,71703333	0,10142495		2,09346063	463,5186665	43851,51997	309,5402231	22,54493333	0,93417054		4,926820945	3544,54311	39686,39976	445,3989247
19,46323333	1,7982448		39,53650692	2982,586403	18182,18707	569,8385641	21,7276	1,88688562		39,3360865	3575,439726	18182,18707	569,8385641	22,53926667	1,79112907		95,50558033	2894,55167	16902,93149	387,8999954
19,46531667	19,2790923		547,2653634	33561,00153	19083,15732	391,4380364	21,72256667	20,333067		412,772897	40438,11346	19083,15732	391,4380364	22,53965	18,987807		1163,665059	31048,9597	17103,29756	575,9370843
19,46316667	102,755895		1789,587419	204779,975	21846,53881	653,9049513	21,72211667	107,518696		2518,52949	244796,0429	21846,53881	653,9049513	22,53378333	102,185384		3659,710412	186852,139	19125,68076	500,739975
19,4652	202,309482		3834,498884	415760,3102	22528,31402	741,9077799	21,72245	214,785704		2686,64263	504280,0965	22528,31402	741,9077799	22,53953333	200,007963		7013,787508	385001,625	20133,6671	527,214829

PCB138 Results					PCB138i (STD) Results		BaA Results					BaA D (STD) Results		Chr Results					Chr D (STD) Results	
RT	Final Conc.	Accuracy	S/N	Resp.	Resp.	S/N	RT	Final Conc.	Accuracy	S/N	Resp.	Resp.	S/N	RT	Final Conc.	Accuracy	S/N	Resp.	Resp.	S/N
23,52436667	1,76222063		55,14883051	2062,454057	12152,85646	380,1894597	24,9265	61,5987173		43,68074531	7823,736565	42649,15375	541,4865721	25,0975	59,6180823		50,65765523	9077,8942	67614,631	62,628908
23,52398333	18,7787524		608,0380423	16554,15139	9153,655289	285,102145	24,92611667	94,6517741		69,98589993	73764,43173	32940,51836	25,58398547	25,09711667	80,7638354		103,1948289	106045,7	55874,457	538,61927
23,52396667	103,560092		2041,729933	107936,1628	10822,5329	322,6912984	24,91898333	285,512056		10717,83219	671644,288	47598,21275	50,67463564	25,08998333	159,618082		Infinity	833811,77	98387,2715	176,8444
23,52385	205,616276		2307,6178	309907,7221	15650,5381	556,2792193	24,91886667	586,568024		3790,783655	1580830,895	48142,9545	32,90523484	25,08986667	255,183076		2002,627685	1863141,8	113292,4155	204,04302
23,62693333	0		2,281653457	0	2156,26859	72,44051513	24,94763333	61,4667923		0,852501967	309,936	1768,652677	9,027989191	25,11151667	59,3337813		1,036220682	386,48479	3496,109872	16,297375
23,51865	2,16132837		12,30168847	6023,21949	28937,58608	648,141819	24,91906667	110,552365		Infinity	212803,7313	65917,62486	46,83387567	25,08295	103,440686		1032,020514	327343,14	86386,215	60,989993
23,51871667	0,45812421		9,502870514	1055,139554	23915,5862	670,8438515	24,91913333	106,420523		306,2884182	142003,2141	47791,12139	40,32553446	25,09013333	96,4792173		424,5265265	216970,24	67619,8915	175,28362
23,5183	1,3615904		13,89234355	4502,575143	34337,51429	898,6737961	24,91871667	159,559117		511,7225004	605165,7875	96417,478	438,0447816	25,08971667	151,74428		1333,799312	903261,3	115534,9865	78,021847
23,51316667	1,40715012		11,12966254	4586,151796	33842,49377	888,6010018	24,91901667	208,4141		Infinity	851975,5568	91460,1755	68,69524271	25,08288333	186,531492		192,5527699	1159418,4	108159,592	93,78733
23,51855	0,17007297		7,657714898	494,0179339	30162,11513	775,4584952	24,9261	65,2669915		72,24098392	33712,62947	81904,63532	93,96047775	25,08996667	65,1969946		298,3124636	54172,313	90351,883	103,65756
23,51875	1,72572183		17,75163461	5599,534	33692,67229	721,0977865	24,91918333	134,567641		Infinity	433816,151	91870,06001	272,9459765	25,09018333	129,238863		1211,560498	619338,41	104248,105	394,9778
23,51343333	0,85996867		10,91582998	3490,720342	42148,95326	930,2996122	24,91926667	126,447006		1249,304982	456611,2628	108279,6135	142,1924084	25,08315	121,861403		1591,818284	658907,42	123722,579	174,72263
23,51855	0,99079549		13,08991087	3651,451073	38268,00585	597,1559331	24,91185	320,355812		12,49343561	1714593,57	105332,1998	26,62283215	25,08285	424,228797		5948,106315	3855550,1	126226,3238	91,863825
23,51883333	1,61027019		12,54388591	6099,834376	39334,50203	727,8451604	24,91925	300,557639		22140,137	1488219,873	98907,85175	44,51391357	25,09026667	280,645176		313,355335	2212921,9	119172,282	130,38055
23,519	1,58808071		13,33021319	4894,608783	32003,66976	712,8603144	24,91943333	119,895348		116,741331	318908,5612	83714,99761	91,96216381	25,0833	117,196249		151,0192164	471857,46	95583,7675	183,55304
23,51351667	1,13867484		6,623085021	3765,581221	34338,92214	397,919204	24,91935	123,923997		755,1604125	324125,8779	79833,276	38,07989066	25,09035	125,51866		638,1574918	500619,64	88908,6495	115,46997
23,52408333	1,72074232		76,16331787	2501,257496	15093,74223	391,9373912	24,92621667	61,2409705		50,33423837	10859,355	67368,85706	333,0675403	25,10435	59,5969439		47,07887671	11275,388	85099,669	47,3975
23,52446667	18,8439291		512,1711265	27343,65767	15067,44148	412,7273687	24,91948333	89,4260474		426,481633	133943,9557	69970,7335	656,5848066	25,09048333	77,1408351		983,1083151	145571,03	91224,186	486,66407
23,5186	102,173698		3203,988546	165488,9069	16818,3793	582,1278228	24,9119	235,71862		136,7136684	833430,4763	75672,94723	55,7853675	25,0829	156,847204		214,8672782	887997,52	107718,4905	545,16682
23,51893333	199,706294		4230,670362	340273,239	17692,54902	514,4481828	24,91223333	435,637309		33707,43812	1820185,798	77625,17918	66,32885563	25,08323333	254,341176		4198,4113	1906193,6	116407,3125	183,70597

PCB180 Results					PCB180i (ISTD) Results		BbF Results					BbFD (ISTD) Results		BkF Results					BkFD (ISTD) Results	
RT	Final Conc.	Accuracy	S/N	Resp.	Resp.	S/N	RT	Final Conc.	Accuracy	S/N	Resp.	Resp.	S/N	RT	Final Conc.	Accuracy	S/N	Resp.	Resp.	S/N
25,91688333	1,75435458		116,5537824	1763,73431	8301,1815	66,47825569	29,64826667	62,1750928		13,00082565	7934,94096	53468,43133	29,83965085	29,74623333	62,4928843		52,72329984	7883,213477	53882,24308	29,89476125
25,9165	19,3986955		725,8878125	19258,75747	8197,470429	39,96090626	29,64411667	76,0102722		22,99094526	95010,9616	62386,81491	231,4758336	29,74753333	75,0142314		345,2814097	97730,71997	62769,37065	188,7817383
25,91648333	103,149418		2397,158816	128139,288	10257,4556	55,62160139	29,63866667	141,523237		44,95475441	659536,067	82116,97245	399,4079916	29,74206667	162,492884		1574,201802	828760,5908	72618,8185	437,3869903
25,91636667	199,581589		4585,553811	275539,6263	11399,5501	69,46981924	29,6331	219,855588		54,36319461	1509677,66	95464,58419	307,5955465	29,73651667	234,635688		3095,481897	1873066,147	95857,01412	361,5220302
26,02351667	1,67429738		0,788221313	294,2635826	1451,202577	6,342021816	29,66435	61,8408006		0,544207492	153,02736	1328,4525	12,29632925	29,69701667	63,2030199		1,204112503	376,9933067	1665,830036	6,859701172
25,91658333	1,36183857		21,81981996	3619,720649	21946,91828	122,8858515	29,63708333	115,162095		183,3440932	338907,386	62613,61949	45,01123686	29,7296	96,4797873		3,894051784	346395,5591	87136,35586	298,2741596
25,91665	0,27057313		11,68667599	584,7178431	17843,73651	86,01753619	29,63713333	103,212346		6,749830642	215925,018	51100,86038	35,99751478	29,73511667	88,9870589		22,50413704	218561,7166	69801,62284	370,230033
25,92336667	0,75266414		16,84241486	2354,898871	25834,20825	159,4837125	29,63841667	157,544277		63,48512684	799016,923	83028,8865	35,40115072	29,73638333	128,03455		0,291970171	845007,9059	112213,7555	176,1959373
25,91651667	0,82158881		15,24774215	2578,373091	25912,86094	149,4883915	29,63325	197,909126		4,902271631	1077546,35	79035,96633	45,75602941	29,70945	145,10255		429,7246037	993662,5964	105113,3098	321,2297276
25,90935	0,10988317		3,722744806	298,8246442	22454,80783	108,6302764	29,63865	69,4472056		23,12211703	62102,6191	71309,30996	33,18668453	29,73118333	66,0808336		14,48563673	49176,86043	89326,55271	33,74046781
25,91668333	1,03488084		15,52381857	3268,875189	26081,4728	129,0400255	29,63718333	141,462638		108,0902021	654004,76	81489,36922	50,73357595	29,7025	113,994433		2,938697127	629491,3563	105822,5166	162,6720699
25,91678333	0,47877187		2,779603088	1879,544878	32415,16176	150,798519	29,63728333	129,796674		60,98774989	653047,834	95104,58656	48,61843628	29,73525	105,834339		281,0855805	635405,3899	126342,5435	341,7832898
25,91648333	0,56513433		12,95875116	2029,019	29645,48388	175,371548	29,63865	354,783323		264,6982531	2730141,77	93436,831	54,9491996	29,73118333	280,835654		5601,742992	3034167,131	122616,5035	45,50924191
25,91676667	0,9067733		13,30947129	3331,705278	30338,35131	159,0208297	29,63726667	270,421428		452,0157244	1790491,01	85925,39904	116,2610372	29,69713333	195,956753		3,22141737	1713202,384	112840,0479	286,4700413
25,90981667	0,9265803		18,0983074	2776,7715	24744,64359	121,3747491	29,63743333	122,406159		45,6953124	465429,574	75897,074	47,52790291	29,6973	101,35488		19,2990461	420173,6811	92865,01204	215,6078174
25,90973333	0,6611005		13,16207872	2110,6405	26361,54776	134,6197923	29,63735	131,081963		31,44455222	496895,884	71042,7519	44,43287169	29,73531667	101,46545		13,36986266	407235,925	89758,44083	130,1480708
25,9166	1,74228646		44,1030857	2274,111119	10777,45561	100,2039607	29,64798333	62,5215388		14,18698716	11190,6514	61210,05874	33,02137879	29,74595	62,4495108		34,7666751	11164,99403	78950,33273	300,0862777
25,91698333	18,6789872		645,1690126	25081,91396	11087,44481	75,03187538	29,63748333	81,6790229		49,17497906	134266,181	64361,51037	47,28664555	29,7409	77,9310154		353,2115234	159314,2792	84490,37082	338,8071263
25,91653333	99,698064		4852,811131	150879,992	12495,94338	82,21734527	29,63326667	180,684007		62,81816283	788897,943	66169,94792	90,42366226	29,73668333	148,201959		1378,107883	933116,9688	95192,34886	207,8951214
25,91686667	196,414078		5367,477434	307908,9219	12944,15732	81,53574815	29,63191667	318,666283		75,6196437	1700117,45	66330,82845	35,59605397	29,73533333	228,006637		2414,93072	2008651,659	106880,8697	910,2595575

BaP Results					BaP D (STD) Results		Ind Results					Ind D (STD) Results		DBA Results					DBA D (STD) Results	
RT	Final Conc.	Accuracy	S/N	Resp.	Resp.	S/N	RT	Final Conc.	Accuracy	S/N	Resp.	Resp.	S/N	RT	Final Conc.	Accuracy	S/N	Resp.	Resp.	S/N
30,8729	62,12451363		20,56221703	6010,784533	32004,621	138,410718	34,9847167	60,4254299		31,47889789	6364,245699	36498,95206	122,9829674	35,1535333	60,715333		42,88266259	7394,537287	47028,36903	385,2618078
30,86875	75,75097275		156,6626938	71695,21141	32814,907	168,2485128	34,9797667	65,0329571		109,9911828	82553,70766	40778,19797	32,59178417	35,1485833	78,569334		236,1202098	91893,7934	54394,7261	343,7384773
30,8633	162,1245136		1069,98371	555042,2629	37393,41	201,2611648	34,9735	91,7654516		2359,593797	581463,1054	45574,48794	32,74867964	35,1423167	160,715333		736,1570768	604142,4805	69133,36003	253,8973891
30,86318333	291,193376		1792,635433	1331032,386	39427,466	49,73792543	34,9733833	129,796773		2651,253532	1346749,476	48047,61669	37,05216722	35,1422	280,452915		3478,426249	1441486,063	75811,21372	285,4668591
30,69305	61,66653781		1,300188765	142,6228797	1181,7171	11,103781	35,0095	60,3317134		2,118039715	213,2700733	1559,706554	10,85210578	35,1783167	59,0813774		0,961541019	40,43212798	2376,019123	18,6491795
30,86715	90,58802057		130,3144073	268849,5243	61672,901	209,6632892	34,9781667	69,0854239		153,0225966	230630,8345	63157,64694	12,97520499	35,15325	65,1948775		8,474815265	38620,53007	71301,5575	13,5522648
30,86721667	88,24005373		127,7226606	178824,752	44537,226	47,45602148	34,9782333	66,6384508		518,7118858	147583,598	55292,96208	20,88287954	35,14705	64,1014105		1,761814225	25939,68258	57925,12285	19,0117042
30,86305	108,4398927		247,6751288	601106,501	86173,178	48,34569383	34,9795	74,345455		152,2426737	537097,4558	93185,22023	16,83894386	35,1545667	70,493575		10,07690711	102305,6775	102679,2637	8,322967565
30,86333333	140,6821062		327,7697831	812812,4826	69466,261	36,57661514	34,9735333	78,4655178		253,8375888	666685,3097	89872,58294	19,47135216	35,1486	74,1907369		126,6344368	139059,0615	105858,148	50,05428556
30,87416667	65,04221049		49,63745984	41878,34765	68049,156	44,62142853	34,986	61,2304503		50,90361832	39137,32458	78650,16684	50,07917871	35,1548167	59,8940959		1,928130759	7564,090253	87183,37108	171,3961073
30,86726667	124,7132945		332,2462754	542626,888	57969,778	0,761469147	34,9845167	72,9023817		471,4565377	484347,2024	93425,47788	136,9763028	35,1596	68,4531631		1,706666759	85541,58308	104158,6505	10,4115257
30,86191667	116,0605801		396,4520361	529112,1897	65383,726	16,61693495	34,9783667	70,1496674		190,831451	450737,9055	110502,02	18,968148	35,1471833	68,0234673		1,736405538	88473,11649	112792,5735	10,00144659
30,86328333	363,5834947		Infinity	2381016,126	53664,981	10,56711925	34,9734833	99,1954621		280,4739076	1689711,872	107338,221	283,9771671	35,1485667	86,0967213		41,15235266	286538,4825	122695,88	10,05065051
30,8619	199,0499103		11202,6888	1382686,844	68264,24	232,327734	34,9721	90,6204084		246,4265287	1181517,585	96068,13728	20,14607428	35,1471667	79,5126302		6,539990062	222145,5305	125482,0245	33,02797787
30,86751667	119,9716803		266,6177281	360802,025	41636,099	27,20355137	34,9785167	68,5930985		114,5166587	307022,876	88889,52251	179,8061235	35,1536	67,1484855		1,797097832	64896,18447	91493,194	11,70684216
30,86743333	146,7426011		420,1027229	383173,3738	30437,109	8,829418257	34,9847	70,2375328		274,5434149	337326,1765	81989,06231	149,312181	35,1535167	67,7645416		1,852545537	64828,22574	85057,668	10,0658334
30,87806667	62,04487508		44,10419097	10738,32926	60965,271	235,6520195	34,9844333	60,3776289		27,98686319	11434,15714	73686,02112	49,74753866	35,1532667	60,6006944		49,32508536	12370,47494	83925,72863	256,2812778
30,86755	74,18134482		233,3200046	131446,4845	67242,943	171,405862	34,9785667	64,5249099		107,9988455	143264,11	78696,75689	55,68340842	35,1474	78,2031057		295,2204383	150978,3374	91062,72425	247,6536161
30,86335	138,3349573		1223,862348	776465,3369	68369,857	170,7142325	34,97355	85,1804701		1252,937472	801433,3717	79236,76307	48,07829935	35,1423667	155,615622		1274,249637	825708,3535	99468,99333	243,7849907
30,85655	231,5748528		2372,672168	1666870,273	66617,208	198,2009147	34,9722	114,751528		1892,646323	1634640,174	74341,48319	22,43083865	35,1410167	261,768583		Infinity	1702174,595	97765,74772	74,10525269

BghiP Results					BghiP D (STD) Results	
RT	Final Conc.	Accuracy	S/N	Resp.	Resp.	S/N
35,7788167	61,2783092		63,8281704	9902,1626	64315,04012	170,9371952
35,7738667	77,4433817		251,1842289	111610,379	66651,72435	240,3602885
35,7676	161,278309		1006,934296	714951,906	74782,13673	199,1824094
35,7674833	267,341812		1040,193512	1557447,16	79716,48973	225,7774049
35,7285667	61,6086821		4,318681302	669,13822	669,1382203	20,31022274
35,7722667	92,240855		251,9985005	196605,482	64114,90045	143,7197193
35,7660667	85,7370794		132,3181488	160647,642	65445,51286	118,560393
35,7736	114,560293		Infinity	551604,117	106777,241	127,3446689
35,7738833	127,16595		Infinity	628400,153	98934,40775	146,5138441
35,7801	64,6795059		86,65940428	42937,3905	90604,90332	129,7232344
35,7786167	110,435573		330,8145733	505444,515	105787,085	159,1135829
35,7724667	98,8949486		883,8899037	447959,592	121320,2529	246,5510382
35,7675833	217,817036		Infinity	1717637,79	115442,1179	261,658563
35,7662	172,220946		646,8813501	1129109,84	106622,5669	154,3438262
35,7726167	93,2862232		358,5332199	312154,314	98633,56401	163,0616506
35,7725333	97,0766259		124,4827655	315797,97	89681,39138	129,6059017
35,7722833	61,2642885		53,1133571	14145,3887	92668,80616	235,0182698
35,7664167	76,6008851		356,6267358	160173,972	100404,8288	316,9026978
35,7614	149,135929		3002,865318	874436,258	103873,3742	397,3688058
35,76005	242,952829		1018,122102	1790267,39	103824,6787	202,7713129